UNIVERSITÉ DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE
ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES (555)

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE

Discipline* : *GEOGRAPHIE

Spécialité : Géographie physique

Présentée et soutenue publiquement par

Pierre-Yves ANCELIN

Le 27 mars 2026

LES FORTIFICATIONS SÉRÉ DE RIVIÈRES COMME RELIEFS ANTHROPIQUES : MORPHOGENÈSE, TRAJECTOIRES PAYSAGÈRES ET IMPLICATIONS GÉOPATRIMONIALES

APPROCHE ARCHÉOGÉOMORPHOLOGIQUE (LIDAR, SIG, ARCHIVES) DE LA CEINTURE FORTIFIÉE DE REIMS (MARNE, FRANCE)

Thèse dirigée par M. Alain DEVOS

Et M. Frédéric GUGELOT

JURY

M. François BÉTARD,	Professeur des Universités,	Sorbonne Université,	**Président**
M. Alain DEVOS,	Professeur des Universités,	Université de Reims Champagne-Ardenne,	**Directeur de thèse**
M. Frédéric GUGELOT,	Professeur des Universités,	Université de Reims Champagne-Ardenne,	**Co-Directeur**
M. Phillipe BOULANGER,	Professeur des Universités,	Sorbonne Université,	**Rapporteur**
M. Xavier ROCHEL,	Professeur des Universités,	Université de Lorraine,	**Rapporteur**
Mme Murielle GEORGES-LEROY,	Conservatrice générale du Patrimoine,	Ministère de la Culture,	**Invitée**
M. Jean-Michel DURLET,	Ingénieur,	Membre de l'AAFNA,	**Invité**

Groupe d'Étude sur les Géomatériaux et ENvironnements Anthropisés

GEGENA

Écoles Doctorales urca

Université de Reims Champagne-Ardenne

GRAND REIMS
COMMUNAUTÉ URBAINE

Ancelin Pierre-Yves, Les fortifications Séré de Rivières comme reliefs anthropiques : morphogenèse, trajectoires paysagères et implications géopatrimoniales - Approche archéogéomorphologique (LiDAR, SIG, archives) de la ceinture fortifiée de Reims (Marne, France). Thèse de doctorat : Géographie physique, Reims, Université de Reims Champagne-Ardenne, GEGENA, 2026, 1 vol, 663 p. 333 figures, 51 tableaux, 71 annexes, 510 réf.

TABLE DES MATIÉRES

AVANT-PROPOS **23**
INTRODUCTION GÉNÉRALE **26**
1. CADRE CONCEPTUEL **39**
1.1. Géomorphologie et fortification : le paysage comme cadre intégrateur 40
1.1.1. La polysémie du paysage 40
1.1.2. Le paysage géomorphologique 41
1.1.3. Le paysage fortifié de Reims : du paysage de défense au paysage de guerre 42
1.2. Approche géomorphologique de l'Anthropocène 44
1.2.1. Anthropogéomorphologie : étude des impacts environnementaux 44
1.2.2. Archéogéomorphologie 48
1.3. La révolution du LiDAR en archéologie et en géomorphologie 51
1.3.1. Fonctionnement 51
1.3.2. LiDAR en archéologie 52
1.3.3. LiDAR en géomorphologie et dans l'étude des polémoformes 55
1.4. Justification de l'objet de la thèse et hypothèses de recherche 58
2. DU SYSTÈME AU FORT SÉRÉ DE RIVIÈRES **61**
2.1. Évolutions militaires, scientifiques et techniques au XIXe siècle 62
2.1.1. Héritages et remises en cause du système bastionné (XVIIIe - début XIXe siècle) 62
2.1.2. La première moitié du XIXe siècle : entre conservatisme français et innovations étrangères 64
2.1.3. Mutations balistiques et inflexion doctrinale sous le Second Empire 65
2.2. Contexte politico-militaire de la guerre franco-prussienne et naissance du système 69
2.2.1. La guerre franco-prussienne : faillite du système défensif et bouleversements de 1871 69
2.2.2. Redressement national : réorganisation militaire et contrôle territorial après 1871 72
2.2.3. Innovations techniques et rationalisation militaire : armement, chemin de fer et géographie militaire 75
2.3. L'émergence d'un paysage fortifié : le système Séré de Rivières 78
2.3.1. Chronologie du Comité de défense 78
2.3.2. Doctrine de la fortification permanente après 1871 80
2.4. Aspects architecturaux, organisationnels et théoriques des forts de type 1874 86
2.4.1. Définition et typologies 86
2.4.2. Organisation interne 89
2.4.3. Étapes de construction 96
2.5. Crise de l'obus-torpille et transformations du système (1885-1914) 101
2.5.1. Crise de l'obus-torpille 101
2.5.2. Incidences techniques sur les structures des forts 103
2.5.3. Incidences doctrinales et stratégiques 105

2.5.4. Les forts pendant la guerre 107
Conclusion du chapitre 2 109
3. PRÉSENTATION DU SECTEUR D'ÉTUDE 112
3.1. Paramètres géographiques et environnementaux 112
3.1.1. Une situation géostratégique de contact et de passage 113
3.1.1.1. La ceinture fortifiée de Reims dans le système de cuestas du Bassin parisien 113
3.1.1.2. La Champagne crayeuse 116
3.1.1.3. Plateaux cénozoïques 116
3.1.1.4. Côte d'Île-de-France : héritage paléogène et dégagement quaternaire 117
3.1.1.5. Vallées majeures et percées cataclinales : organisation des passages 117
3.1.2. Des sites fortifiés diversifiés liés aux conditions de dépôt au Paléogène et au dégagement des reliefs au Quaternaire 120
3.1.2.1. Avant-buttes sur craie (Campanien) 121
3.1.2.2. Buttes-témoins 123
3.1.2.2.1. Thanétien 123
3.1.2.2.2. Yprésien 126
3.1.3. Un climat océanique dégradé structurant les processus naturels 130
3.1.4. Contexte hydrogéologique 133
3.1.4.1. Un cadre hydrogéologique contraignant pour des ouvrages implantés en position dominante 134
3.1.4.1.1. Aquifère et nappe de la craie 134
3.1.4.1.2. Aquifère et nappe de l'Éocène 136
3.1.4.2. Stratégies d'alimentation en eau des forts de la ceinture de Reims 137
3.1.4.2.1. Captage de la nappe de la craie par puits profonds 138
3.1.4.2.2. Exploitation des nappes perchées tertiaires 139
3.1.4.2.3. Absence de puits et recours à des ressources alternatives 141
3.1.4.2.4. Dispositifs complémentaires et systèmes hybrides 141
3.1.5. Contexte biogéographique, occupation du sol et matrices paysagères 142
3.1.5.1. Un cadre biogéographique de transition contrôlé par le relief et la géologie 142
3.1.5.2. Des ensembles biogéographiques contrastés au sein de la ceinture fortifiée 146
3.1.5.2.1. La Champagne crayeuse 146
3.1.5.2.2. Reliefs de formations tertiaires 149
3.1.5.3. Contextes végétaux actuels au droit des ouvrages fortifiés 151
Conclusion de la partie 3.1 156
3.2. Contexte historique 157
3.2.1. Agrosylvosystème rural champenois 157
3.2.1.1. Fin du XVIIIe siècle 158
3.2.1.2. XIXe siècle 160
3.2.1.3. Mont de Berru 163
3.2.1.4. Mont de Brimont 166
3.2.1.5. Massif de Saint-Thierry 170

3.2.1.6. Synthèse du cadre paysager initial ... 175
3.2.2. Contextualisation historique pré Séré de Rivières ... 177
3.2.2.1. Histoire militaire régionale anté-XIXe ... 177
3.2.2.2. Émergence de la valeur stratégique de Reims et de la côte d'Île-de-France ... 181
3.2.3. Mise en place de la ceinture fortifiée de Reims ... 183
3.2.3.1. Reims dans la réorganisation défensive d'après-guerre ... 183
3.2.3.1.1. Cadre institutionnel ... 184
3.2.3.1.2. Cadre décisionnel (Comité de défense) ... 184
3.2.3.2. Mise en œuvre et phasage de la construction de la ceinture de Reims ... 188
3.2.3.3. Empreinte territoriale et foncière du chantier ... 192
3.2.3.4. Fonctionnement initial et évolution tactique de la place de Reims jusqu'en 1914 ... 195
3.2.3.4.1. Phase 1 : la place forte de Reims ... 196
3.2.3.4.2. Phase 2 : la fin d'un ensemble homogène ... 197
3.2.3.4.3. Phase 3 : les forts comme points d'appui ... 198
3.2.3.4.4. L'intégration aux réseaux de défense de la Première Guerre mondiale ... 198
Conclusion de la partie 3.2 ... 202
Conclusion du chapitre 3 ... 203
4. MATÉRIELS ET MÉTHODES ... 205
4.1. Archives ... 207
4.1.1. SHD ... 209
4.1.1.1. Archives de l'armée de l'Air (AI) ... 209
4.1.1.2. Guerre et armée de Terre (GR) ... 210
4.1.1.3. Modalités de récupération des archives ... 213
4.1.2. Archives départementales de la Marne ... 213
4.1.2.1. Série Fi - Archives figurées ... 214
4.1.2.2. Série M - Police et administration générale : fonds de la préfecture de la Marne (1M-202M) ... 214
4.1.2.3. Série P - Finances, cadastres, postes ... 215
4.1.2.4. Série U - Justice ... 216
4.1.3. Archives communales et fonds privés ... 217
4.2. Banques de données cartographiques, planimétriques, photographiques ... 219
4.2.1. Banques de données géoréférencées préexistantes ... 219
4.2.1.1. Banques de données vectorielles ... 220
4.2.1.1.1. Limites administratives et occupation du sol (vecteur) ... 220
4.2.1.1.2. Géologie, foresterie, écologie (vecteur) ... 221
4.2.1.2. Banques de données raster ... 223
4.2.1.2.1. Écologie, topographie (raster) ... 223
4.2.1.2.2. Occupation du sol (raster) ... 223
4.2.2. Banques de données cartographiques et planimétriques créées ... 226
4.2.2.1. Carte de Cassini ... 230
4.2.2.2. Atlas de Guettard ... 231

4.2.2.3. Cadastre napoléonien ... 232
4.2.2.4. Carte d'État-Major ... 236
4.2.2.5. Cartes et plans de la décennie de construction des forts (1874-1884) ... 239
4.2.2.6. Plans directeurs des GCTA ... 240
4.2.2.7. Carte spéciale des régions dévastées ... 243
4.2.3. Photographies aériennes ... 244
4.2.3.1. Photographies aériennes de la Première Guerre mondiale ... 244
4.2.4. Photographies aériennes postérieures (Remonter le temps, BD LOTERR) ... 250
4.3. LiDAR aéroporté ... 252
4.3.1. Acquisition et traitement des données brutes ... 255
4.3.2. Traitement du nuage de points et traitements dérivés ... 257
4.3.2.1. Classification ... 257
4.3.2.2. Interpolation du Modèle numérique de terrain (MNT) ... 261
4.3.2.3. Traitements de visualisation ... 262
4.3.3. Interprétation archéo(géomorpho)logique ... 270
4.3.3.1. Intégration de données complémentaires ... 270
4.3.3.1.1. Modalités d'accès ... 271
4.3.3.1.2. Exemple de l'intégration du cadastre napoléonien ... 274
4.3.3.2. Cartographie interprétative ... 275
4.3.3.3. Validation de terrain ... 281
4.3.3.4. Interprétation approfondie ... 283
4.3.3.4.1. Analyse morphométrique ... 284
4.3.3.4.2. Estimation du degré d'effacement ... 284
i) Rugosité ... 284
ii) Pente ... 285
iii) Taux d'effacement des polémoformes de la Première Guerre mondiale ... 287
4.3.3.4.3. Estimation des volumes remblayés ... 288
4.3.3.5. Cartographie automatique ... 291
4.4. Études de terrain (diagnostic environnemental) ... 293
4.4.1. Étude des géomatériaux ... 293
4.4.1.1. Géomatériaux : définition et problématique ... 294
4.4.1.2. Étude des géomatériaux *stricto sensu* ... 296
4.4.1.3. Étude du site d'extraction au site de construction ... 298
4.4.1.4. Méthodologie d'acquisition LiDAR terrestre des souterrains (Leica BLK2GO) ... 300
4.4.2. Étude de la biocénose ... 302
Conclusion du chapitre 4 ... 306
5. INVENTAIRE ET ANALYSE SPATIALE DES MORPHOLOGIES RÉVÉLÉES AU LIDAR ... 308
5.1. Inventaire global ... 309
5.2. Fortifications Séré de Rivières ... 315

5.2.1. Approches planimétrique, géométrique et typomorphologique (échelle du fort) ... 316
5.2.1.1. De la géométrie à la fonction militaire : deux lectures de l'enceinte ... 317
5.2.1.2. Relations entre l'enceinte et la crête d'artillerie ... 320
5.2.1.3. Profils d'origine ... 322
5.2.1.4. Analyse morphométrique de la forme globale des forts ... 323
5.2.2. Approche topographique LiDAR (échelle du fort) ... 328
5.2.2.1. Planimétrie et rugosité ... 328
5.2.2.2. Altimétrie et pentes ... 329
5.2.2.2.1. Dénivelé théorique ... 330
5.2.2.2.2. Profils topographiques ... 330
5.2.2.2.3. Distribution des valeurs de pente de la zone périphérique ... 332
5.2.2.3. Volumétrie ... 335
5.2.3. Approche topographique LiDAR (échelle de l'organisation interne) ... 340
5.2.3.1. Morphologies les plus lisibles ... 340
5.2.3.1.1. Action lointaine ... 341
i) Terre-pleins ... 342
ii) Traverses ... 343
iii) Rampes d'accès ... 347
iv) Rue du rempart ... 349
v) Plongées et talus extérieurs ... 352
5.2.3.1.2. Défense rapprochée ... 354
i) Glacis ... 354
ii) Fossé (« plafond » et murs) ... 355
iii) Contrescarpe ... 366
iv) Caponnières ... 368
v) Fossés diamants ... 373
vi) Bonnettes ... 373
vii) Ravelins ... 375
viii) Ponts et corps d'entrée ... 375
ix) Massif de terre ... 376
x) Cas particuliers ... 383
5.2.3.2. Morphologies les moins lisibles ... 385
Conclusion de la partie 5.2 ... 389
5.3. Polémoformes de la Première Guerre mondiale ... 390
5.3.1. Polémoformes linéaires ... 390
5.3.1.1. Tranchées et boyaux ... 390
5.3.1.2. Voies ferrées ... 396
5.3.1.3. Épaulements d'origine militaire ... 398
5.3.2. Polémoformes ponctuelles ... 400
5.3.2.1. Structures militaires ... 400

5.3.2.2. Positions d'artillerie ... 404
5.3.2.3. Cratères d'obus ... 408
5.3.3. Organisation spatiale des polémoformes ... 412
5.3.3.1. Cuesta et revers de côte du Massif de Saint-Thierry ... 412
5.3.3.2. Buttes-témoins de Brimont et Berru ... 414
5.3.3.3. Avant-buttes de craie ... 418
Conclusion de la partie 5.3 ... 420
5.4. Carrières et autres formes archéologiques ... 422
5.4.1. Carrières ... 422
5.4.1.1. Morphologie et morphométrie ... 423
5.4.1.2. Butte-témoin de Berru ... 425
5.4.1.3. Butte-témoin de Brimont ... 431
5.4.1.4. Massif de Saint-Thierry ... 435
5.4.2. Épaulements, fossés et levées ... 441
5.4.2.1. Épaulements ... 441
5.4.2.2. Fossés et levées ... 445
Conclusion de la partie 5.4 ... 450
Conclusion du chapitre 5 ... 451
6. DISCUSSION ... 453
6.1. Morphogenèse des formes Séré de Rivières ... 453
6.1.1. Genèse des reliefs fortifiés ... 454
6.1.1.1. Volumétrie et géomatériaux ... 454
6.1.1.2. Plantations militaires ... 462
6.1.1.3. Facteurs explicatifs ... 466
6.1.1.4. Polémoformes indirectes ... 469
Conclusion de la partie 6.1.1 ... 472
6.1.2. Paysage en guerre (fonction défensive passive) ... 473
6.1.2.1. Utilisation des forts pendant le conflit ... 473
6.1.2.2. Expression morphologique actuelle ... 476
6.1.2.3. Bombturbation ... 482
Conclusion de la partie 6.1.2 ... 487
6.1.3. Paysage d'après-guerre, trajectoires post-conflictuelles (fonction défensive désactivée) ... 488
6.1.3.1. Facteurs de conservation ... 489
6.1.3.2. Requalification foncière ... 492
6.1.3.3. Prélèvement de géomatériaux cohérents ... 493
6.1.3.4. Autres modifications et destructions liées à la guerre ... 493
6.1.3.5. Bioérosion ... 496
6.1.3.6. Gélifraction et infiltration ... 496
6.1.3.7. Aléa gravitaire ... 497
Conclusion de la partie 6.1.3 ... 499

6.1.4. Héritages écologiques 500
6.1.4.1. Fortification et guerre : impacts écologiques 500
6.1.4.2. Dynamique de reconquête forestière 502
6.1.4.3. Végétation actuelle du fort de Brimont 504
6.1.4.4. Fonctionnement écologique hérité des polémoformes 507
6.1.4.5. Implications cindyniques et perspectives de recherches 511
Conclusion de la partie 6.1.4 513
6.1.5. Limites méthodologiques 515
Conclusion de la partie 6.1 517
6.2. La ceinture de Reims dans le système Séré de Rivières 520
6.2.1. Les forts de Reims dans le système Séré de Rivières 520
6.2.2. Effets du contexte géomorphologique 522
6.2.2.1. La contrainte topographique locale comme facteur de modulation morphologique 522
6.2.2.2. Contextes à contrainte morphologique structurelle et limites de la comparabilité 525
6.2.3. Des trajectoires paysagères différenciées 530
6.2.3.1. Des politiques de modernisation sélectives (fonction défensive active) 530
6.2.3.2. Une majorité d'ouvrages préservée de la Grande Guerre 531
6.2.3.2.1. Guerre de mouvement 532
6.2.3.2.2. Guerre de position 534
6.2.3.3. Des trajectoires différenciées 537
6.2.3.3.1. La ville et ses forts : un splendide isolement 538
6.2.3.3.2. La ville et ses forts : une relation de voisinage 540
Conclusion de la partie 6.2 546
Conclusion du chapitre 6 547
CONCLUSION GÉNÉRALE 550
ARCHIVES 559
BIBLIOGRAPHIE 565
TABLE DES ANNEXES 596
ANNEXES 599
TABLE DES FIGURES 652
TABLE DES TABLEAUX 662

REMERCIEMENTS

Ce travail de thèse a été mené en un peu plus de quatre ans, mais il constitue en réalité l'aboutissement d'un parcours engagé bien en amont. Mes premiers remerciements s'adressent à celles et ceux qui ont encadré et orienté ce cheminement scientifique. Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Alain Devos pour m'avoir accueilli au sein de ce projet et accordé sa confiance tout au long de ces années. Par sa compréhension de la géographie, son exigence, son attention et la liberté qu'il a su laisser à mes initiatives, il a joué un rôle déterminant dans la construction de ce travail et m'a transmis une conception de la recherche à laquelle je souscris pleinement aujourd'hui, celle d'une thèse envisagée avant tout comme une aventure humaine. Je remercie également très sincèrement Frédéric Gugelot pour sa patience, sa compréhension et l'ouverture dont il a fait preuve à l'égard de ce travail, ainsi que pour ses relectures attentives et son attention constante au bon déroulement de la thèse.

Plus largement, ma reconnaissance va à ceux qui, plus en amont, m'ont mis sur la voie de la recherche et ont contribué à structurer mon approche scientifique. Je pense particulièrement à Vincent Ollive et Dominique Harmand du LOTERR, qui, les premiers, ont cru en mes capacités et m'ont encouragé, tant moralement, que matériellement, financièrement ou scientifiquement dans cette voie. Depuis lors, leur constante disponibilité, leurs conseils avisés et les perspectives scientifiques qu'ils m'ont ouvertes ont durablement nourri la réflexion conduite dans cette thèse et ne cesseront d'influencer ma pratique de la science. Je suis à ce titre très reconnaissant envers l'équipe pédagogique du département de géographie de Nancy et du LOTERR dans son ensemble, qui m'ont permis de devenir un géographe. Merci également à Charles Kraemer et Jean-Claude Sztuka, qui ont (en particulier mais pas que) contribué à façonner mes pratiques de terrain et ma réflexion archéologique, à travers mes deux premiers secteurs d'étude dans le Massif du Fossard et la forêt de Spincourt.

Je tiens ensuite à remercier les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail et de consacrer du temps à sa lecture. Leur présence témoigne de l'intérêt porté à cette recherche et constitue pour moi un véritable honneur. Je tiens à remercier sincèrement Philippe Boulanger et Xavier Rochel, rapporteurs de cette thèse, pour avoir accepté d'en assurer l'évaluation attentive. Les travaux de Philippe Boulanger en géographie militaire et sur les paysages de guerre, ainsi que ceux de Xavier Rochel à l'interface de la biogéographie et de la géohistoire sur le patrimoine naturel et bioculturel, ont constitué des références importantes dans la construction de cette recherche. Je remercie également François Bétard pour l'honneur qu'il me fait en participant à ce jury en qualité d'examinateur, ses travaux sur le géopatrimoine et les reliefs anthropiques ayant particulièrement contribué à nourrir la réflexion menée dans ce manuscrit. Je tiens enfin à exprimer ma reconnaissance à Murielle Georges-Leroy pour sa présence dans ce jury, dont les recherches pionnières sur l'apport du LiDAR en archéologie et dans l'analyse des paysages ont constitué un cadre méthodologique de référence tout au long de mon parcours universitaire. Je souhaite également remercier Jean-Michel Durlet, membre invité de ce jury et représentant de l'Association des Amis du Fort de Nogent-l'Abbesse, pour l'intérêt constant porté à ce travail et pour la collaboration étroite développée au fil de cette recherche. Nos échanges réguliers et les projets menés en commun ont largement nourri cette thèse, et je me réjouis que cette collaboration scientifique se soit progressivement doublée d'une relation amicale

fondée sur une passion partagée pour ces fortifications et sur une bienveillance toujours précieuse à mon égard.

Je remercie par ailleurs l'Université de Reims Champagne-Ardenne et la Communauté urbaine du Grand Reims, qui ont rendu possible l'engagement de ce travail en finançant conjointement mon contrat doctoral initial. J'adresse mes remerciements particuliers à Catherine Coutant, conseillère communautaire engagée dans les questions patrimoniales, pour l'attention portée à ces recherches, ainsi qu'à Catherine Vautrin, alors présidente du Grand Reims, pour l'intérêt qu'elle a manifesté à l'égard de cette thématique et pour le soutien apporté à la diffusion de ces travaux, notamment à l'occasion de la publication d'un ouvrage collectif auquel j'ai eu l'opportunité de contribuer. Je remercie également Yves Détraigne, ancien sénateur de la Marne, pour l'intérêt porté à ces travaux et pour les échanges engagés autour du devenir de la ceinture fortifiée de Reims, ainsi que pour m'avoir reçu afin d'en discuter.

Je remercie ensuite le Parc naturel régional de la Montagne de Reims, en particulier Maéva Rény et Fanny Bourgoin, ainsi que le GEGENA, pour la confiance accordée dans le cadre de l'étude des vieilles forêts du parc, qui a rendu possible le financement de ma quatrième année de doctorat et ouvert de nouvelles perspectives de recherche.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à l'Association du fort de Nogent-l'Abbesse (AAFNA), à son ancien président Daniel Quantinet ainsi qu'à son actuel président Régis Chanoir, pour l'accueil et la confiance accordés tout au long de cette recherche. Mes remerciements s'adressent également à la coopérative vinicole de Nogent-l'Abbesse et Cernay-lès-Reims, propriétaire du fort, pour avoir permis un accès privilégié à l'ensemble du site. Au-delà de cet accès exceptionnel, j'ai bénéficié d'un soutien constant, à la fois matériel et moral, qui a largement contribué à l'élaboration de cette thèse et à son inscription durable sur le territoire. Je remercie chaleureusement l'ensemble des membres de l'association pour leur disponibilité et leur accompagnement régulier sur le terrain. Je pense par exemple à Jean-Michel et Isabelle, Vincent, Alexandre, Sébastien, Ludovic, Pascal, Jean-Noël, Bernard, Francis ou Bruno dont l'engagement et l'intérêt pour ces recherches ont nourri des échanges aussi précieux qu'enrichissants, mais également les nombreux autres membres de l'association.

Je tiens à remercier tout particulièrement l'Institut national de l'information géographique et forestière pour la mise à disposition de données d'une qualité remarquable, en particulier les données LiDAR HD, dont l'accès au cours de cette thèse a constitué une opportunité déterminante et en a profondément structuré la démarche. Je remercie également les équipes de l'institut pour la qualité des échanges techniques menés tout au long de leur exploitation.

Je tiens à saluer la disponibilité constante des équipes des Archives départementales de la Marne de Châlons-en-Champagne et du Service historique de la Défense au château de Vincennes, notamment David Sbrava, dont l'accueil en salle de lecture et l'aide apportée dans l'orientation des recherches ont été particulièrement précieux. Dans le cadre d'une thèse consacrée aux paysages et aux héritages militaires, l'accès aux fonds spécialisés du Service historique de la Défense a constitué une ressource essentielle, permettant d'ancrer cette analyse géomorphologique dans une documentation historique et technique de premier ordre. Je remercie également la Bibliothèque nationale de France, dont le portail Gallica a constitué une source documentaire privilégiée tout au long de cette recherche, en

facilitant l'accès à de nombreuses archives, techniques et théoriques, tant manuscrites, cartographiques qu'iconographiques, indispensables à l'analyse géohistorique.

Je remercie Bénédicte Hernu, directrice des musées de Reims, et Frank Lesjean, responsable des collections militaires, pour l'accès aux archives municipales. Mes remerciements vont également à l'Office national des forêts, notamment à Solène Dupuy et Jean-Baptiste Richard, ainsi qu'aux archéologues du Grand Reims dirigés par Anne-Laure Brives, pour les échanges méthodologiques engagés autour des données LiDAR et de l'environnement archéologique local.

Je remercie les sociétés savantes marnaises (SACSAM, SESNR) pour l'intérêt porté à mes travaux, et tout particulièrement Hubert Guérin, dont la connaissance approfondie de la géologie régionale et l'engagement de longue date dans la connaissance du territoire ont constitué une source d'échanges et d'inspiration précieuse tout au long de cette thèse.

Un grand merci au Groupe français de géomorphologie qui, au fil de plusieurs années de participation aux Journées des jeunes géomorphologues, a constitué un espace essentiel de formation, de discussion, d'élaboration et de structuration de mon approche scientifique, mais également de rencontres et de sociabilisation et m'a finalement accordé une bourse qui m'a permis de présenter ces travaux au Congrès international de géomorphologie. J'adresse en particulier ma reconnaissance à Armelle Decaulne et Denis Mercier, actuelle et ancien présidents de l'association, pour leur engagement et leur soutien à l'égard des jeunes chercheurs.

Je remercie également les équipes du service du déminage de Colmar pour l'intérêt porté à ces travaux et pour les échanges engagés autour des traces matérielles et géomorphologiques des conflits. Je remercie tout particulièrement Éric Schnell pour m'avoir offert l'opportunité de présenter les recherches menées au sein du GEGENA devant une délégation ukrainienne engagée dans les réflexions sur le déminage et la gestion post-conflit. Ces échanges, inscrits dans une coopération internationale placée sous l'égide du ministère de l'Europe et des Affaires étrangères et de l'OSCE, ont conféré à cette recherche une portée appliquée et contemporaine particulièrement stimulante.

Enfin, un grand merci à mon laboratoire, le GEGENA, dirigé par Gilles Fronteau, dont le soutien financier et matériel constant, ainsi que l'accès aux équipements nécessaires au bon déroulé des travaux, ont été indispensables malgré l'absence de financement de fonctionnement dédié. Je remercie notamment mes collègues du quotidien, actuels et passés, pour leur présence et leur aide, en particulier Olivier et Nicolas pour leur prévenance et leur investissement dans le bon fonctionnement du laboratoire, Delphine, Xavier, Auguste, Jérémy, Mathieu, Sarah, Robin, Guillaume, ainsi que Pauline, Anaïs et Alexandra, dont l'engagement administratif et la disponibilité, hier comme aujourd'hui, ont constitué un appui aussi précieux qu'indispensable au bon déroulement de la vie du laboratoire. Je souhaite également adresser mes remerciements à Christophe, Sakhina et Louisette, dont la présence quotidienne et le travail discret mais essentiel ont largement contribué à la qualité de l'environnement de travail au sein du laboratoire et au confort nécessaire à la conduite d'un travail de recherche au long cours. Mes remerciements vont également à Marie-Hélène ainsi qu'à Françoise, dont la générosité, l'intelligence et la bienveillance à mon égard ont constitué, dès les premiers instants, un soutien précieux. Enfin, Théo, dont l'appui technique et méthodologique a été particulièrement important, a représenté une aide et une valeur ajoutée incontestables tout au long de cette thèse.

Je souhaite également remercier l'ensemble des équipes des écoles doctorales de l'Université de Reims Champagne-Ardenne pour leur accompagnement attentif tout au long de ce parcours doctoral. J'adresse mes remerciements particuliers à Béatrice Marin, vice-présidente en charge des écoles doctorales, ainsi qu'à Nina Bogataia, coordinatrice des écoles doctorales, et Valérie Piraube, pour leur soutien et leur disponibilité pendant la thèse et en particulier dans le cadre de l'aventure Ma thèse en 180 secondes, qui a constitué une expérience aussi formatrice qu'enrichissante. Ma reconnaissance va également à l'école doctorale SHS et à l'ensemble de son équipe, dirigée par Chrystel Besche-Richard et co-dirigée par Bertrand Goujon, pour la qualité de leur encadrement et de leur suivi administratif. Je remercie tout particulièrement Fanny Pierrot pour son accompagnement constant du quotidien, ainsi que Véronique Delaitre pour son aide précieuse dans l'organisation de la soutenance, ainsi que pour leur valeureuse patience à l'égard de mes temporalités administratives parfois distendues.

Cette recherche doit également beaucoup aux acteurs de terrain, collectivités, associations et propriétaires qui ont facilité l'accès aux sites étudiés et accompagné de nombreuses campagnes d'observation. Je remercie à ce titre les communes de Taissy, de Pouillon et de Brimont, ainsi que les associations engagées dans la valorisation des forts, notamment Rèmes Brigade, présidée par Rémi Cotret, et l'association des forts de Saint-Thierry et de Brimont, présidée par William Donato, pour leur disponibilité constante et leur soutien aux investigations de terrain. Mes remerciements s'adressent également à l'ensemble des personnes qui ont accepté de partager leur connaissance du territoire et d'ouvrir des sites parfois difficilement accessibles, en particulier Mme Tona, propriétaire du Réduit de Chenay. Je tiens enfin à exprimer une reconnaissance particulière à celles et ceux qui m'ont accompagné sur le terrain et permis la réalisation de relevés botaniques et géomatériaux indispensables à cette recherche, notamment Philippe Laporte, Gilles Fronteau et Sébastien Laratte, lesquels m'ont par ailleurs beaucoup apporté sur le plan méthodologique.

Je souhaite également adresser une mention particulière à l'égard de Bernard Fouqueray, dont la connaissance approfondie des fortifications rémoises et l'accès généreusement accordé à une documentation accumulée au fil de nombreuses années ont constitué une ressource d'une valeur exceptionnelle pour cette thèse. D'une manière différente, mais tout aussi enrichissante, j'ai eu la chance de bénéficier de l'expertise de Florian Garnier, spécialiste reconnu de la fortification contemporaine en France, dont la grande disponibilité et la précision des échanges ont contribué à la justesse des descriptions et du vocabulaire employés dans ce travail. D'autres rencontres dans cet univers de la fortification ont enrichi mes connaissances et ma compréhension du système Séré de Rivières. Il s'agit notamment de Alain Montferrand, président de l'Association Vauban ayant accepté ma participation aux premières journées du patrimoine fortifié à Vincennes, Mathieu Panoryia et Martin Barros, archiviste au SHD, Nicolas Czubak du Mémorial de Verdun, Julien Dépret, historien de la fortification et Ollivier le Tinnier de Mémoires et fortifications m'ayant gracieusement autorisé à utiliser certaines de ses photographies.

Outre les membres du jury précédemment cités, ma reconnaissance s'adresse plus largement à l'ensemble de la communauté scientifique qui a nourri cette recherche, au fil des discussions comme à travers la bibliographie. Je pense en premier lieu à Pierre Taborelli et à Rémi De Matos-Machado, dont les thèses de géographie physique soutenues en 2018 sur l'impact environnemental de la Première Guerre mondiale ont constitué une source d'inspiration directe dans l'élaboration épistémologique et méthodologique de mon

approche, cette thèse s'inscrivant dans la continuité de cette école française consacrée à l'étude des traces géomorphologiques des conflits. Je souhaite également citer Jean-Paul Amat, biogéographe incontournable dans l'analyse des paysages de guerre, Philippe Diest, historien des patrimoines militaires, ainsi que Ralf Hesse, pionnier de l'utilisation du LiDAR dans l'étude des polémoformes. Mes remerciements vont également aux nombreux jeunes chercheurs, liés de près ou de loin à ces thématiques et rencontrés au fil des colloques et échanges scientifiques, parmi lesquels Axel Creach, Jules Kemper, Éloi Vincendet, Léa Mairaville, Émilie Portier, Anaïs Fichot, Théophile Piau, Dorian Béranger et Amélie Duquesne. Je souhaite enfin adresser une attention particulière à mon Massif vosgien d'origine, en remerciant François Magar, président du GRABE, pour nos échanges sur l'archéologie de la vallée de la Bruche, ainsi que Jean-Baptiste Ortlieb, une présence inspirante dans mon parcours, pour la confiance accordée dans la gestion du volet LIDAR HD du programme ROSSBERG 3D.

Au-delà du cadre strictement universitaire, cette thèse doit également beaucoup à celles et ceux qui m'ont accompagné sur le plan personnel au fil de ces années. Je souhaite remercier l'ensemble de mes amis pour leur présence et leur soutien constants, pour les moments de respiration et de recul qui ont jalonné l'écriture de ce travail et permis d'en préserver l'équilibre. J'adresse une reconnaissance particulière à Goustinello, notamment pour sa relecture attentive de mes articles en anglais, et à Florian pour la stimulation intellectuelle qu'il ne cesse de susciter, qui ne constitue qu'une infime part de la manière dont ils enrichissent, chacun à leur manière, mon quotidien. Merci également à Quentin pour l'amitié partagée au cours de ces années et pour ce qu'elle continue de représenter aujourd'hui, à Louis, Loïc et Paul pour avoir marqué et embelli mes années de master, ainsi qu'à Hélène, Margot, Marine, Cathy, Danaé, Adrien B., Maxime, Ilona, Benoît et Myrtille, dont l'amitié, la confiance et les échanges, parfois réguliers, parfois plus espacés mais toujours précieux, ont constitué un appui réel tout au long de ce parcours doctoral.

Je souhaite également remercier ma famille pour son soutien indéfectible au fil de ces années de doctorat. Leur présence, leur patience face aux contraintes et aux changements de rythme qu'impose un tel engagement, ainsi que leur confiance dans cette trajectoire exigeante, ont été essentiels à l'aboutissement de cette thèse. Je pense notamment à ma marraine Sandrine, à mon parrain Philippe et à ma tante Claire, dont la présence fidèle et l'attention constante ont toujours compté pour moi, indépendamment de la fréquence de nos échanges. J'ai également une pensée toute particulière pour ma mère et Salomon, qui ont toujours cru en moi, pour mes sœurs chéries Marine et Sarah, pour leur patience et leur souplesse face à mon investissement universitaire, pour Sylvie, pour son soutien constant, ainsi que pour mon père, pour son dévouement sans faille et son soutien inconditionnel. J'ai à ce titre une pensée pour ma grand-mère ainsi que pour mon grand-père paternel que je n'ai pas connu, mais dont l'esprit se retrouve sans doute dans ces travaux, tant sa passion pour les fortifications fait écho avec l'objet de cette thèse.

Cinq personnes viennent enfin clore ces remerciements, car leur présence pendant cette thèse revêt une résonance particulière. Il s'agit de toi, Flavie, qui m'as porté et soutenu avec une sincérité, une attention et une affection sans faille que je n'oublierai pas ; de toi, Élise, véritable boule de vie dont l'énergie rayonnante a constitué une précieuse source de lumière et d'élan dans cette aventure doctorale parfois trop casanière ; de toi Adrien A., dont la sensibilité et la subversivité ont constitué une source intarissable d'émancipation au sein

d'une société très prompte à la rationalisation et à l'oubli de certaines valeurs et sensations qui fondent pourtant l'expérience humaine.

Ariane, tu es un véritable soleil d'un enthousiasme inégalable arrivé dans ma vie à un moment peu propice à l'évasion, celui d'une quatrième année de thèse particulièrement dense, et tu as su, malgré les contraintes de ce rythme accaparé, faire preuve d'une présence et d'un soutien constants, ainsi que d'une patience et d'un équilibre qui m'ont été d'une valeur inestimable en cette fin de parcours.

Enfin, le dernier mais non des moindres, Julien, figure difficile à situer entre sphère professionnelle et personnelle tant les apports dans l'une comme dans l'autre ont été déterminants, dont la présence a profondément marqué ces années et dont l'influence a contribué à façonner le chercheur que je suis aujourd'hui. Par ton exigence, ton énergie et ton soutien constant, ainsi que par ton optimisme et ton dévouement sans faille, tu as contribué à tirer vers le haut ce travail comme les nombreux projets menés en parallèle. Toujours présent dans les moments décisifs, tu as accompagné ce parcours avec une loyauté et une générosité rares, au point d'en devenir l'une des principales clés de voûte. Pour cela, et pour l'amitié essentielle qui en est née, je t'adresse ma profonde gratitude.

Pour terminer, j'ai également beaucoup pensé à ce moment où j'allais remercier mes grands-parents, Thérèse et Laurent, décédés il y a maintenant deux ans, et qui m'ont toujours demandé « Tu cherches, tu cherches, mais quand est-ce que tu trouves ? ». Mamie, Papy, ça y est, j'ai trouvé. Merci pour tout.

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

A

AAFNA	Association des Amis du Fort de Nogent-l'Abbesse
ACP	Analyse en composantes principales
AD51	Archives départementales de la Marne
AEP	Alimentation en eau potable
AGBP	Association des Géologues du Bassin de Paris
AG	Atlas de Guettard
AI	Armée de l'Air
ALS	Airborne Laser Scanning
ALGP	Artillerie lourde à grande puissance
ALVF	Artillerie lourde sur voie ferrée
AP	Atlas de Poinsignon
ASPRS	American Society for Photogrammetry and Remote Sensing

B

BA	Base aérienne
BD	Banque / Base de données
BNF	Bibliothèque nationale de France
BRGM	Bureau de recherches géologiques et minières

C

CAH	Classification ascendante hiérarchique
CarHab	Cartographie nationale des habitats naturels et semi-naturels terrestres
CATNAT	Cartographie des gradients de naturalité potentielle
CC	Carte de Cassini
CD	Comité de défense
CEM	Carte d'État-Major
CENCA	Conservatoire des espaces naturels de Champagne-Ardenne
CERHIC	Centre d'études et de recherche en histoire culturelle
CFSV	Carte de France du service vicinal
CG	Carte géologique

CLC	CORINE Land Cover
CMTP	Commission mixte des travaux publics
CN	Cadastre napoléonien
CNRTL	Centre national de ressources textuelles et lexicales
CSRD	Carte spéciale des régions dévastées
CUGR	Communauté urbaine du Grand Reims

D

DGFiP	Direction générale des Finances Publiques
DMCA	Direction de la Mémoire, de la Culture et des Archives

E

e^4MSTP	Enhanced Multi-Scale Topographic Position
EQM	Erreur quadratique moyenne
ESTG	École supérieure technique du Génie
EUNIS	European Nature Information System

F

FCC	Fréquence cumulée croissante
FWF	Full Waveform

G

GAK	Generallandesarchiv Karlsruhe
GCTA	Groupe de canevas de tir des armées
GEGENA	Groupe d'étude sur les géomatériaux et environnements anthropisés
GES	Gaz à effet de serre
GIS	Groupement d'intérêt scientifique
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GQG	Grand Quartier Général

H

HD	Haute définition
HERSOL	Héritage environnemental de la Grande Guerre : impacts de la Première Guerre mondiale sur les propriétés et le fonctionnement des sols agricoles et forestiers
HIC	Habitats d'intérêt communautaire

I

IDW	Inverse distance weighting

IGN	Institut national de l'information géographique et forestière
INPN	Inventaire national du patrimoine naturel
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IRC	Infrarouge couleur
IAMG	International Association for Military Geosciences

J

JMO	Journal des marches et des opérations

K

K-T	Crétacé - Tertiaire

L

LAS	LiDAR aerial survey
LAZ	LAS compressé
LiDAR	Light Detection and Ranging
LRM	Local Relief Model

M

MOLIMO	Morphologie LiDAR en Montagne de Reims
MNE	Modèle numérique d'élévation
MNS	Modèle numérique de surface
MNT	Modèle numérique de terrain

N

NASA	National Aeronautics and Space Administration
NGF	Nivellement général de la France

O

OCS GE	Occupation du sol à grande échelle

P

P2ATS	Patrimoines militaires : Architectures, aménagements, techniques et sociétés
PAG	Petit âge glaciaire
PCI	Plan cadastral informatisé
PCR	Programme collectif de recherche
PG	Plan du Génie
pH	Potentiel hydrogène
PIB	Produit intérieur brut

PNN	Parc national
PNR	Parc naturel régional

R

RAP	Régiment d'artillerie à pied
REG	Restes Explosifs de Guerre
RGB	Red Green Blue
RgI	Roughness index
RMSE	Root Mean Square Error
RTM	Restauration des terrains en montagne
RNR	Réserve naturelle régionale
ROC	Reconnaissance optique de caractère
RPG	Registre parcellaire graphique
RVT	Relief Visualization Toolbox

S

SC25	SCAN 25®
SC	Sous-commission de défense
SDR	Séré de Rivières
SECREI	Morphologies et paysages de la ceinture fortifiée Séré de Rivières de Reims
SER	Sylvoécorégion
SGA	Service général pour l'administration
SH50	Scan 50® Historique
SHA	Service historique de l'Armée
SHAT	Service historique de l'Armée de Terre
SHD	Service Historique de la Défense
SHS	Sciences humaines et sociales
SIG	Système d'information géographique
SK	Stellungskarte
SRCE	Schéma régional de cohérence écologique
STG	Section technique du Génie
SVF	Sky-view Factor

T

TIN	Triangular Irregular Networks

TPI	Topographic Position Index
TPS	Thin Plate Spline
TRI	Terrain Ruggedness Index
TVB	Trame verte et bleue

U

UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
URCA	Université de Reims Champagne-Ardenne
URSS	Union des républiques socialistes soviétiques

V

VAT	Visualization for Archaeological Topography

W

WMS	Web Map Service
WTMS	Web Tile Map Service

Z

ZAN	Zéro artificialisation nette
ZNIEFF	Zone naturelle d'intérêt écologique, faunistique et floristique

GLOSSAIRE

Compte tenu du positionnement de ce manuscrit à l'intersection de plusieurs disciplines, ce glossaire a vocation à expliciter certains mots de vocabulaire et concepts spécifiques dans les acceptions retenues dans le cadre de cette recherche.

À l'épreuve	Se dit d'un ouvrage ou d'une structure conçus pour résister aux effets des projectiles et de l'artillerie.
Anthropocène	Notion désignant un temps d'évolution caractérisé par les transformations progressives et intensifiées du système terrestre sous l'effet des interactions entre sociétés humaines et milieux, envisagé non comme une époque géologique formellement définie, mais comme un processus de transformation planétaire en cours (Edgeworth et al., 2023).
Anthropogéomorphologie	Branche de la géomorphologie qui étudie l'action des sociétés humaines sur les reliefs et les processus qui modifient la surface terrestre (Goudie, 1993).
Archéogéomorphologie	Branche de la géomorphologie qui analyse les formes du relief créées ou transformées par les sociétés passées comme des traces culturelles matérielles de l'activité humaine inscrites dans le paysage (Thornbush, 2012, 2013).
Battre	Couvrir un espace par un feu efficace et continu, de manière à interdire ou contraindre tout mouvement adverse.
Défilé	Passage étroit, souvent encaissé dans une vallée ou entre des reliefs, constituant un point de circulation contraint et un secteur stratégique pour le contrôle des déplacements et de la défense.
Défilement	Protection d'un espace, d'un ouvrage ou d'une troupe contre les vues et les tirs ennemis, assurée par le relief naturel ou par l'implantation et l'organisation des structures défensives.
Flanquement	Disposition défensive permettant de battre latéralement les abords d'un ouvrage ou d'un fossé afin d'en interdire l'approche et d'en assurer la protection.
Front de gorge et de tête	Dans un ouvrage fortifié, le front de tête correspond à la partie tournée vers l'ennemi, tandis que le front de gorge désigne la face opposée, orientée vers l'intérieur du dispositif défensif.
Géodiversité	« […] [V]ariabilité du monde abiotique, dans ses composantes géologique (roches, minéraux, fossiles), géomorphologique (formes du relief), pédologique (sols) et hydrologique (eaux de surface et souterraines), ainsi que l'ensemble des processus naturels (internes et externes) et anthropogéniques qui en sont à l'origine […] » (Bétard, 2017).

Géopatrimoine	« Composantes abiotiques […] de la planète faisant l'objet d'actes de patrimonialisation (reconnaissance collective, protection, labellisation, valorisation […] ; Hobléa et al., 2014).
Magasins-sous-roc	Magasin à munitions creusé dans le substrat rocheux ou profondément enterré, visant à protéger les réserves des bombardements et des explosions.
Métadonnée	Informations décrivant le processus de traitement et les choix méthodologiques appliqués aux données, permettant de retracer la chaîne de production des résultats.
Morphogenèse	Identification et analyse des processus responsables de la formation du relief. Elle vise à reconnaître les mécanismes qui ont produit les formes observées et à comprendre leur évolution dans le temps.
Palimpseste topographique	Métaphore empruntée au palimpseste manuscrit, désignant la superposition de formes et de structures héritées de différentes périodes dont les traces successives demeurent lisibles dans la topographie actuelle.
Paradonnée	Informations descriptives associées aux données, documentant leur origine, leurs caractéristiques techniques et leurs conditions d'acquisition afin d'en assurer la compréhension et la réutilisation (Lozić et Štular, 2021).
Paysage de conflit	Paysage dont l'organisation et la morphologie ont été façonnées par des activités militaires ou des situations de conflit armé, laissant des traces durables dans la topographie et l'occupation du sol.
Paysage fortifié	Paysage structuré par la présence d'ouvrages de défense et d'aménagements militaires, dont l'implantation, l'organisation et les formes modifient durablement la morphologie et la lecture du territoire.
Polémoforme	Forme du relief créée ou profondément transformée par des activités militaires ou des conflits, constituant une trace morphologique durable de la guerre dans le paysage.
Relief anthropique	Forme du relief résultant directement de l'action humaine, intentionnelle ou non, modifiant durablement la topographie naturelle.
Vigie	Petit ouvrage ou poste fortifié destiné à l'observation et aux communications optiques, généralement implanté en position élevée ou centrale dans un dispositif défensif et pouvant être casematé afin d'assurer la transmission de signaux et la surveillance du territoire environnant.

AVANT-PROPOS

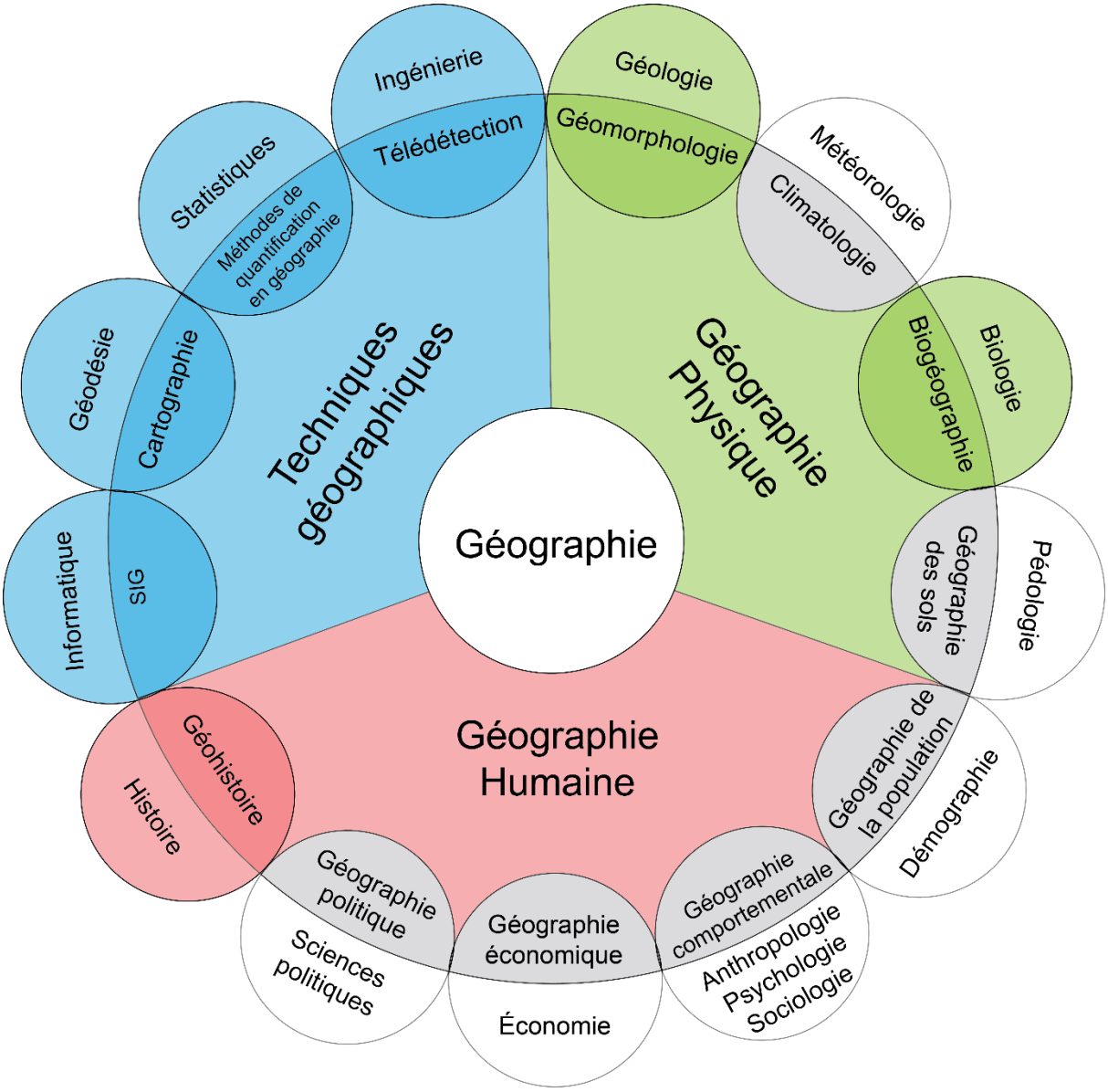
Le philosophe Ernst von Glaserfeld estimait que : « *les conclusions auxquelles arrive un scientifique sont, en toute circonstances, conditionnées par sa façon de voir, sa façon d'observer et sa façon de lier conceptuellement les éléments qu'il découpe à même son expérience* » (Larochelle et Désautels, 1992).

Partant de ce postulat, cette note d'intention circonscrit partiellement la subjectivité de ce travail, en situant mon propos par l'évocation de mon parcours personnel, afin de tendre vers davantage d'objectivité. Elle renseigne succinctement le point de vue depuis lequel j'ai construit mon image de la science et ces recherches doctorales, en observant et analysant des données et de la documentation que je me suis appropriées ou que j'ai créées.

Sur le plan familial, tout d'abord, mon intérêt pour les fortifications Séré de Rivières, apparu en 2021 dans le cadre de ce projet de thèse, entérine une troisième génération d'attention portée envers ce système défensif. Il s'inscrit dans la continuité de mon père et de mon grand-père paternel, deux officiers Saint-Cyrien dont la passion pour la fortification permanente contemporaine a généré des conditions intellectuelles et morales propices à ce qu'une partie de ma vie soit dévolue à l'étude de ces ouvrages fortifiés. Des conditions matérielles également, grâce à une origine et une situation franciliennes ayant grandement facilité mes déplacements au Service Historique de la Défense au Château de Vincennes, ainsi qu'à la faveur de l'existence d'un fonds d'archives familial dédié à ce système fortifié, dont certains documents ont pu enrichir ce travail.

Ensuite, cette approche est le fruit d'un parcours universitaire spécifique. La fin de mon aventure doctorale intervient dix ans après le début de mon cursus de géographie à l'Université de Lorraine, réalisé à la faculté de lettres de Nancy. Après une licence généraliste présentant un large spectre de la discipline, mon premier degré de spécialisation s'est effectué par l'intermédiaire d'un master mention « *Paysage, Patrimoine et Environnement* », ainsi que par la réalisation de deux stages de recherche, réalisé au sein du LOTERR, dédiés à l'utilisation de données LiDAR aéroportées dans l'étude d'anomalies topographiques d'intérêts géomorphologique et archéologique. Ce cheminement a finalement conduit à la réalisation de cette thèse au sein du GEGENA, dans le cadre d'une approche physique et environnementale attentive aux formes héritées et aux traces matérielles inscrites dans le relief. L'analyse géomorphologique des paysages fortifiés présentée ici s'est construite à partir de ce parcours, au croisement des rencontres, du terrain, des archives et des outils mobilisés au fil de ces années.

Diagramme de Fennemann schématisant mon identité de géographe
(d'après Millsaps et al., 2020)



INTRODUCTION GÉNÉRALE



Entrée du fort de Montbré (novembre 2022)

INTRODUCTION GÉNÉRALE

- CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE

Cette thèse s'inscrit dans le projet SECREI (nov. 2021 - nov. 2024), réalisé en partenariat entre les unités de recherche de géographie physique, le Groupe d'Étude sur les Géomatériaux et ENvironnements Anthropisés (GEGENA) et d'histoire, le Centre d'Études et de Recherche en Histoire Culturelle (CERHIC), de l'Université de Reims Champagne-Ardenne (URCA), sous la direction respective des Prs Alain Devos et Frédéric Gugelot, et en collaboration avec l'Association des Amis du Fort de Nogent-l'Abbesse (AAFNA). Ce projet visait initialement à cerner les impacts environnementaux (morphologiques, pédologiques, hydrogéologiques, écologiques) des fortifications Séré de Rivières de l'est de la ceinture de Reims via l'étude localisée d'un site atelier (le fort de Nogent-l'Abbesse), pour finalement se focaliser sur l'approche géomorphologique de tous les ouvrages de Reims.

Ces travaux ont été valorisés à travers la publication de 5 articles scientifiques, 2 chapitres d'ouvrage, 9 communications en colloque, 4 posters et 6 communications de médiation culturelle.

- CONTEXTE ACADÉMIQUE

Ce travail doctoral s'inscrit en ce sens dans la continuité d'une dynamique de recherche amorcée au GEGENA depuis 2015 autour des impacts environnementaux des conflits armés (fig. 0.1). Cette niche scientifique s'est développée à l'occasion du centenaire de la Première Guerre mondiale, sous l'impulsion du programme IMPACT 14-18 dirigé par Alain Devos, qui a notamment abouti à la thèse de Taborelli (2018) et à l'organisation d'un colloque international (Devos, 2019). Depuis, quatre projets ayant abouti à la réalisation de trois thèses ont prolongé et diversifié ces recherches : l'étude de la pollution hydrogéologique aux perchlorates sur les anciens champs de bataille (Perchl'eaurigine ; Cao, 2020), l'analyse de l'impact morphologique de la guerre dans les lignes arrières et du forçage hydrologique induit par les polémoformes (Molimo ; Berthe, 2024), l'examen géomorphologique des fortifications Séré de Rivières (SECREI), et l'étude des incidences pédologiques des combats de la Grande Guerre (HERSOL ; en cours).

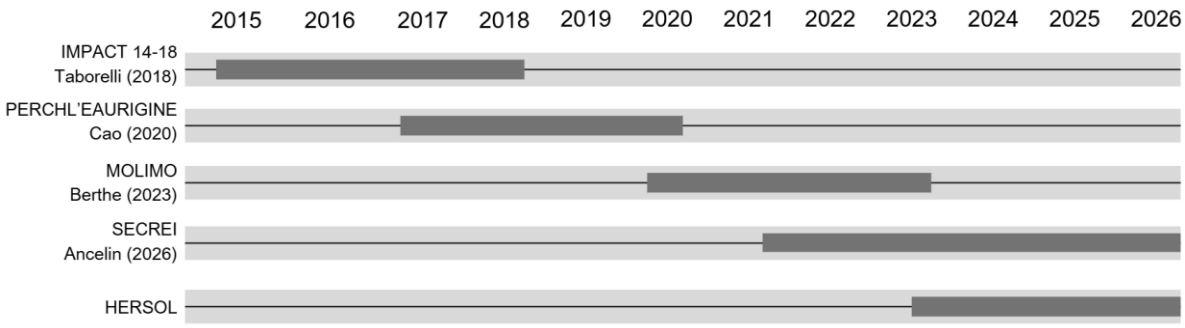


Figure 0.1 : Projets portant entièrement (Taborelli, 2018 ; Cao, 2020 ; Ancelin et al., 2023 ; HERSOL) ou partiellement (Berthe, 2024) sur l'étude des impacts environnementaux des conflits armés.

- CONTEXTE TERRITORIAL ET ENJEUX

Le financement de la masse salariale du projet SECREI, assuré conjointement par l'URCA et la Communauté Urbaine du Grand Reims (CUGR), témoigne de l'intérêt porté par les collectivités territoriales aux forts de la ceinture de Reims, dans un contexte de développement oenotouristique soutenu par des associations viticoles propriétaires de certains ouvrages fortifié (*e.g.*, AAFNA). Cet attrait s'exprime dès la fin des années 1990 par l'établissement d'un groupe de réflexion, créé sous l'impulsion du Conseil Général de la Marne, et notamment de M. Yves Détraigne (Sénateur de la Marne de 2001 à 2023). Cette dynamique territoriale a permis d'identifier des enjeux stratégiques liés au patrimoine bâti et architectural des fortifications, ainsi que de définir des actions prioritaires. Parmi celles-ci figurent la valorisation conjointe du champagne et du patrimoine militaire, le soutien aux initiatives associatives et la création d'une route touristique, visant à renforcer leur intégration dans le tissu territorial. Cette dynamique territoriale s'est concrétisée en 2023 par l'inscription à l'UNESCO de 139 sites funéraires et mémoriels de la Grande Guerre en Belgique et en France dont 12 sites situés dans la Marne[1].

- LES 150 ANS DES FORTIFICATIONS SÉRÉ DE RIVIÈRES

Deux décennies plus tard, cet engouement départemental n'a pas perduré, en dépit du fait que les années 2024-2025 constituent les 150 ans de l'élaboration du système Séré de Rivières en France, ainsi que de la construction des forts dans la couronne de Reims, où les travaux sont respectivement entamés en 1874 et 1875.

Ces fortifications constituent pourtant l'un des principaux systèmes défensifs de l'histoire de France, conçu par la IIIe République, naissante, afin de pallier l'infériorité militaire révélée par la défaite de 1870-1871 face à la Prusse (Rocolle, 1973). Elles participent d'un moment de cristallisation du sentiment national français face à l'humiliation de la défaite,

[1] https://whc.unesco.org/fr/list/1567/

et à l'affirmation du modèle prussien, tant sur les plans politique, militaire qu'intellectuel. La construction intellectuelle et politique de la France de cette période se forge alors en miroir de la puissance allemande, dans une logique d'affrontement et de redéfinition identitaire (Digeon, 1959). La fortification du territoire national par la IIIe République peut donc être lue comme une réponse non seulement stratégique mais aussi profondément symbolique, comme celle d'une nation en quête de redressement, soucieuse de matérialiser sa résilience dans la pierre des forts.

Le système Séré de Rivières se concrétise ainsi entre 1874 et 1885, par l'intégration de 372 forts polygonaux détachés, dont 234 créés *ex nihilo* (type 1874 ; Diest, 2022), principalement destinés à couvrir les frontières septentrionales et orientales de la France (Séré de Rivières, 1873), puis de 1886 à 1914 par l'ajout de plus de 200 nouveaux ouvrages fortifiés. Ces derniers sont construits en réponse aux avancées techniques et aux évolutions doctrinales de l'armée. Les fortifications de la première tranche deviennent, pour leur part, obsolètes à partir des années 1885-1886, suite à une rupture technologique majeure (« crise de l'obus-torpille »). Elles seront soit modernisées, soit progressivement abandonnées. Dans la plupart des cas, les fortifications Séré de Rivières ne sont confrontées à aucun combat, ou sont le théâtre d'affrontements sporadiques pendant la Première Guerre mondiale, sauf en ce qui concerne les places de Verdun et de Reims, intégrés aux réseaux de défense pendant la guerre de position.

L'intérêt de cette thèse se porte sur ces forts de type 1874, dont les bases sont jetées par l'instruction du 9 mai 1874. Quelle que soit leur dénomination (*e.g.*, réduit, batterie, fort) et leur dimension, chaque ouvrage de cette première génération correspond à un ensemble de structures aménagées, avec et sans maçonneries, recouvertes d'un massif de terre. Ces structures sont dévolues directement à l'action lointaine de l'artillerie (plateformes de tir, traverses-abris, magasins à poudre et à munitions) ou indirectement (*e.g.*, casernement, vie des soldats) et à la défense rapprochée (fossés, ouvrages de défense). Ces plateformes d'artillerie conséquentes constituent de véritables agglomérations autarciques de plusieurs hectares pouvant accueillir parfois plus d'un millier de soldats, voués à résister à des sièges de plusieurs semaines, dont s'envisage aisément le caractère massif et monumental (fig. 0.2).

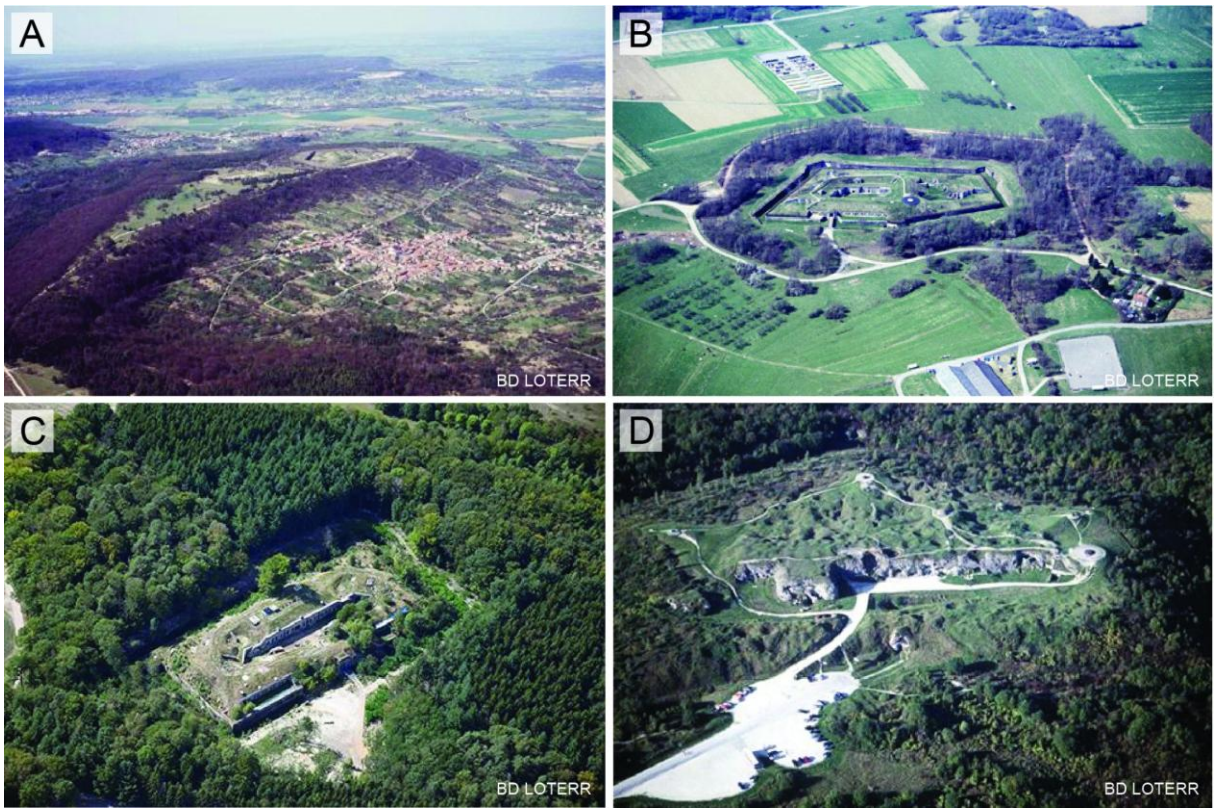


Figure 0.2 : Exemples de fortifications Séré de Rivières en vue aérienne oblique (BD LOTERR). A : Fort de Domgermain (96-0158, ceinture de Toul) ; B : Fort d'Uxegney (96-0123, ceinture d'Épinal) ; C : Fort de Girancourt (18-0407, ceinture d'Épinal) ; D : Fort de Douaumont (94-1943, ceinture de Verdun).

Aujourd'hui, les fortifications Séré de Rivières, tout en continuant à laisser une empreinte aussi marquante dans le paysage, demeurent méconnues du grand public. Sur le plan académique, ce manque de reconnaissance est illustré par une analyse des occurrences Google Scholar (moteur de recherche dédié à la littérature scientifique en ligne) des patronymes associés aux trois systèmes de fortifications les plus récents. En avril 2025, on dénombre 1 220 mentions pour « Vauban » (tournant des XVIIe et XVIIIe siècles), 506 pour « Maginot » (1928-1939) et seulement 42 pour « Séré de Rivières », dont 10 liées directement à l'auteur de cette thèse. Le contraste de notoriété est également saisissant face à l'effervescence scientifique entourant le centenaire de la Première Guerre mondiale. Entre 2012 et 2019, ce dernier a donné lieu, rien qu'en histoire, à la publication de 2 010 articles scientifiques (Heimburger, 2022) et à l'organisation de 226 colloques (Marcobelli, 2022), des chiffres bien supérieurs à la quantité de travaux consacrés aux fortifications Séré de Rivières au cours des 150 dernières années, toutes disciplines confondues.

- ÉTAT DE L'ART HISTORIQUE

L'analyse historiographique de la littérature spécialisée révèle, à ce titre, un intérêt tardif pour ces structures. Probablement cela est-il, dans un premier temps, imputable au débat parfois véhément qui ne cesse de secouer les opposants et défenseurs de la fortification permanente, alimenté par l'obsolescence précoce de « *ces vieux forts démodés et inutiles* » (Rollin, 1915) et l'évolution des mentalités. Dès la fin du conflit, une activité touristique mémorielle, voire thanatologique, se met, certes, en place sur les champs de bataille, perçus comme des « *allégories du corps des combattants et de la douleur de la nation* » (Van Ypersele, 2013). Cette dynamique, qui perdure dans les années 1920 et parfois jusqu'aux années 1930 selon les pays (Lloyd, 1998), s'accompagne de la publication de guides touristiques dédiés aux champs de bataille, tels que le Guide bleu édité par Hachette Livre (Evano et Vincent, 2019). Mais l'intérêt porté aux fortifications dans ce contexte reste ponctuel, voire limité aux forts les plus célèbres de la Grande Guerre, souvent intégrés aux circuits touristiques. C'est le cas, par exemple, du Guide Michelin « *Reims et le fort de la Pompelle* » (Manufacture française des pneumatiques Michelin, 1920) ou du Guide-Historique Jivé de la Marne (Weinmann, 1925), qui mettent en lumière les sites emblématiques des forts de Douaumont, Vaux, ou de la Pompelle, parfois spécialement ouverts au public pour l'occasion. L'intérêt du public pour les fortifications Séré de Rivières ne réapparaît qu'après un demi-siècle de désintérêt, une période marquée par l'essor du tourisme balnéaire, la démocratisation des congés payés, l'élaboration de la Ligne Maginot et la Seconde Guerre mondiale. Truttmann (1994) note un attrait paradoxalement plus précoce pour cette dernière ligne fortifiée (*c.*, 1972) que pour les fortifications de la fin du XIXe siècle, dont l'attention ne s'accroît qu'à partir de la fin des années 1970, avec un intérêt croissant pour l'architecture militaire. Cette période est à ce titre marquée par la création des premières associations dédiées à la protection du patrimoine Séré de Rivières, à l'image des associations des forts de Villey-le-Sec (place de Toul) ou du fort des Ayvelles (sud du Massif ardennais).

Malgré l'impact territorial et socio-économique considérable de leur construction, ainsi que leur rôle dans l'histoire de France, ce système défensif, progressivement tombé dans les oubliettes de l'Histoire, a longtemps été peu abordé par le milieu académique. À partir des années 1980, les fortifications Séré de Rivières bénéficient d'études précieuses issues de la « littérature grise », avant d'être appropriées par le monde universitaire à partir des années 1990 (Diest, 2022). Ces travaux se concentrent principalement sur l'histoire, l'architecture et la technique militaires, comme à travers les nombreuses œuvres de spécialistes tels que Pierre Richard dans les années 2000 (*e.g.*, 2007, 2009, 2011) et Florian Garnier (*e.g.*, 2014, 2021) ou plus souvent par le biais d'approches monographiques locales. Il est par exemple possible de citer les recherches sur les places fortes de Toul (Gaber, 2003 ; Thiebaut, 1987, 2012), La Fère-Laon-Soissons (Barros, 1989, 1996), Maubeuge (Dépret, 2004, 2016) ou

Reims (Capet, 1995 ; Neuville, 1980 ; Méhault, sd.), ou sur des ouvrages emblématiques comme le fort de la Pompelle (Bouxin, 2014 ; Buffetaut, 2016 ; Neuville, 1999) ou le fort de Douaumont (Kaluzko, 2016).

Les années 1990 marquent également un tournant avec l'organisation de trois colloques réunissant spécialistes, collectivités territoriales et universitaires, symbolisant l'émergence des « patrimoines militaires » comme objet d'étude (Association Vauban, 1999 ; CREPIF, 1994 ; Direction du Patrimoine, 1995). En 1995, un colloque à Épinal, organisé pour le centenaire de la mort du Général Séré de Rivières, aborde des thématiques variées : l'histoire de l'armée française (Bernède, 1999 ; Nicole et Rouèche, 1999 ; Riccioli, 1999), l'évolution de l'artillerie (Decker, 1999), les conditions humaines de la réalisation des forts (Brolli, 1999), ainsi que des études de cas sur des places fortes situées en France, au sein du Bassin parisien (Barros, 1999 ; Dutailly, 1999), en montagne (Coquet, 1999) et sur le littoral (Cros, 1999), ainsi que sur leurs équivalents en Allemagne (Bour, 1999 ; Bréguet, 1999) ou aux Pays-Bas (Van Kerkum, 1999). Ce colloque, s'inscrivant dans la lignée des travaux de Truttmann (1992, 1994), met en évidence les enjeux patrimoniaux post-conflictuels et ouvre, à travers la présentation finale de Montferrand (1999), de nouvelles perspectives.

Cette dynamique se poursuit avec les recherches de Diest (2013, 2022) qui établit, notamment, un état des lieux des trajectoires patrimoniales des 234 forts construits *ex nihilo* entre 1874 et 1885 (Diest, 2022). Les années 2000 voient également la publication de trois ouvrages de référence : une présentation générale du système (Le Hallé, 2001), une analyse architecturale approfondie (Truttmann, 2017) et un inventaire exhaustif des fortifications françaises de la période 1874-1914 (Frijns et al., 2008). L'effervescence se poursuit enfin, lors des Journées du Patrimoine en 2021, lors desquelles le Mémorial de Verdun organise des conférences, des visites guidées, des expositions (« *On ne passe pas ! Les fortifications, du système Séré de Rivières à la ligne Maginot* ») et des spectacles autour des fortifications Séré de Rivières. Ces événements, coordonnés par un comité scientifique réunissant François Cochet, Nicolas Czubak, Martin Barros et Matthieu Panoryia, témoignent d'un intérêt patrimonial renouvelé pour ce système fortifié.

- ÉTAT DE L'ART MILITAIRE

L'étude des fortifications Séré de Rivières bénéficie d'une littérature à vocation militaire relativement dense, alimentée par la documentation produite lors de l'élaboration et de la mise en œuvre de ce système défensif. Cette documentation varie selon l'échelle militaire impliquée, que Boulanger (2002, 2006, 2018) décline en trois niveaux : (i) l'échelle géostratégique, relative aux stratégies globales ou régionales, (ii) l'échelle des théâtres d'opération et (iii) l'échelle géotactique, qui implique les paramètres géographiques locaux.

Aux échelles géostratégique et opérationnelle, les procès-verbaux des réunions du Comité de défense et de la Sous-commission de défense constituent des sources essentielles. Ces groupes de réflexions, institués sous l'impulsion du Président Adolphe Thiers et du ministre de la Guerre, le Général de Cissey, ont servi de cadre à l'élaboration du dispositif défensif (Riccioli, 1999 ; Richard, 2009). C'est au sein de la Sous-commission que le Général Séré de Rivières, alors Chef du Génie et secrétaire du Comité de défense, présente les deux mémoires fondateurs de ce système qui portera son nom (Séré de Rivières, 1873, 1874). À l'échelle géotactique, chaque fortification a donné lieu à une abondante documentation technique et cartographique qui constitue aujourd'hui une source historique majeure pour cette thèse, même si elle demeure paradoxalement lacunaire compte tenu du caractère récent de cette entreprise de fortification.

Par ailleurs, des ressources documentaires liées à l'art de la fortification complètent cette base, notamment celles utilisées dans les cours de fortifications dispensés par le Génie. Ces formations, données à l'École d'Application de l'Artillerie et du Génie (Simoutre, 1889a, 1889b) ou plus tard, à l'École Supérieure Technique du Génie (Guillot, 1949), ont accompagné le développement et la transmission des savoirs jusqu'au déclin de la fortification permanente. Après la dissipation du choc de la défaite de 1871, une période de réflexions stratégiques et d'études prospectives s'amorce par ailleurs, tant en France qu'en Allemagne. Ces travaux interrogent la pertinence de la fortification permanente face à un éventuel nouveau conflit avec l'Allemagne (*e.g.*, Pierron, 1878 ; Von Sauer, 1885).

Ce renouveau s'inscrit dans une période de redynamisation, voire d'élaboration, de la géographie militaire française, après un demi-siècle de retards accumulés depuis le Congrès de Vienne (1815) et la démilitarisation de la France post-napoléonienne (Boulanger, 2019). Il se traduit par une intégration rigoureuse de la géographie dans les établissements militaires, la création du Service Géographique de l'Armée en 1887, et la publication de nombreux articles et traités renommés de géographie militaire (Barré, 1898, 1899 ; Fervel, 1870, 1873 ; Marga, 1885 ; Niox, 1881).

- ÉTAT DE L'ART ARCHÉOLOGIQUE

Si la littérature historique, la documentation et les études militaires offrent un corpus dense sur la conception et l'usage des forts, leur appréhension par l'archéologie reste en revanche beaucoup plus marginale. Les fortifications Séré de Rivières sont généralement abordées de manière subsidiaire dans le cadre d'études portant sur d'autres thématiques (*e.g.*, camp retranché de Paris - Dardignac et David, 2015 ; Château de Joux - Metral, 2020). Aucune recherche universitaire explicitement dédiée à cet objet d'étude ne semble ainsi émerger de la bibliographie existante. Quelques travaux isolés portent cependant sur des installations militaires contemporaines, sans traiter des fortifications Séré de Rivières à proprement

parler, comme l'étude du champ de tir d'artillerie et du camp des Pareuses de Pontarlier (1876-1924 ; Perarnau, 2016), ou des travaux dans la trouée de Belfort sur des structures d'artillerie (Lenda, 2015). Cela reflète probablement un intérêt encore limité pour ces structures, dans une archéologie des conflits contemporains encore largement portée sur les deux conflits mondiaux (Billard et al., 2024), malgré l'élargissement récent de ses champs d'investigation (Hurard, 2019). L'archéologie préventive contribue ponctuellement à enrichir les connaissances archéologiques en contexte urbain (Debs et Crecy, 2020 ; Flucher, 2011, 2017) mais elle leur accorde généralement moins d'attention qu'aux fortifications de la Seconde Guerre mondiale (*e.g.*, Mur de l'Atlantique ; Carpentier, 2023). Dans la plupart des cas, elle est toutefois difficilement sollicitée compte tenu de l'isolement géographique initial de ces ouvrages vis-à-vis des villes (*c.*, 6 km), découlant de l'adoption de la fortification détachée au cours du XIXe siècle (Barde, 1996 ; Rocolle, 1973).

- ÉTAT DE L'ART GÉOGRAPHIQUE

Cette différence de situation territoriale implique un contraste d'enjeux de territoire, abordé par la géographie universitaire, notamment lorraine, francilienne et champardennaise, via une approche géohistorique et urbanistique du paysage, entre milieux urbains (Amat et Becker, 1994 ; Reitel, 1994a), périurbains (Mathis A. et Mathis D., 2014) et ruraux (Durup de Baleine, 1998, 2001). D'une part, ces fortifications sont en effet sises dans des espaces ruraux et oubliées derrière un masque végétal, selon cette « *logique d'isolement* » qui les caractérise (Durup de Baleine 1998). Abandonnées au milieu de la forêt et/ou susceptibles d'être soumises à une pression agricole, les faibles dynamiques urbaines n'impliquent que peu d'enjeux mais constituent des « *géosystèmes dérivés paléo-militarisés* » d'une complexité élevée (Durup de Baleine, 1998, 2001), c'est-à-dire des ensembles paysagers hérités d'aménagements militaires dont la morphologie subsiste après l'abandon, mais dont les fonctions se sont transformées.

D'autre part, elles sont « *partiellement digérées* » (Durup de Baleine, 1998) et intégrées tant bien que mal dans le tissu urbain par la croissance périurbaine de certaines agglomérations depuis cent cinquante ans, pouvant constituer des « *lieu[x] riche[s] de potentialités, tant professionnelles que ludiques* », aussi bien que des friches militaires (Amat et Becker, 1994). Une fois que les anciens glacis sont incorporés à la zone urbaine, les forts peuvent en effet se transformer en « *isolat[s] laissé[s] à l'abandon, au cœur d'une forêt de reconquête* » (Mathis A., Mathis D., 2014). Ils peuvent par ailleurs être carrément phagocytés en étant démantelés, car constituant une opportunité foncière parfois considérable, dans des agglomérations où le marché de l'immobilier est particulièrement tendu, tel qu'au sein de l'agglomération parisienne (Reitel, 1994a) et à Lille (Diest, 2013). Ces problématiques urbaines sont également effectives pour les fortifications allemandes équivalentes, notamment implantées

autour de Metz et Strasbourg (type « Biehler » ; Mathis A. et Mathis D., 2014). Quoi qu'il en soit, dans la majorité des cas, les forts ne « *font plus mémoire* », leur obsolescence précoce, leur isolement géographique et, pour certains, leur assimilation à l'ennemi allemand ayant durablement entravé leur patrimonialisation. Cela amène à considérer leur démantèlement comme l'une des options les plus logiques, participant ainsi à un « processus de la ville « *a-patrimonial* » (Mathis A. et Mathis D., 2014). En parallèle de ces réflexions menées en matière d'aménagement du territoire, Chiffre et Sauvage (2016) proposent une étude de géographie historique du réduit du Morvan montrant que la défense du territoire à la fin du XIXe siècle repose d'abord sur une lecture fine du relief et des réseaux de communication. Leur analyse souligne la manière dont l'armée française cherche à choisir et aménager des espaces stratégiques pour compenser ses faiblesses militaires en anticipant un repli et en préparant une contre-offensive.

Plus récemment, des approches spatiales et morphologiques ont émergé dans l'archéologie de la Grande Guerre et l'étude de l'impact géomorphologique des conflits. Ces approches tirent parti de la distanciation analytique offerte par l'exploitation d'outils de télédétection et de documents cartographiques anciens sous système d'information géographique (SIG). Parmi ces sources figurent les photographies aériennes (Stichelbaut, 2009), les cartes militaires (Taborelli et al., 2016), toutes deux produites pendant le conflit et, plus particulièrement, le LiDAR aéroporté (Hesse, 2014 ; De Matos-Machado, 2018).

Les forts Séré de Rivières type 1874, recouverts d'un épais blindage en terre, ont ainsi été étudiés en tant que « *méga-polémoformes* », représentant les morphologies les plus imposantes des champs de bataille de la Première Guerre mondiale (Taborelli et al., 2017b), et plus spécifiquement dans le cadre de leur intégration aux réseaux de défenses de la Grande Guerre (Devos et al., 2019b).

- APPROCHE DE LA THÈSE, PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

Cette thèse s'inscrit dans cette dernière dynamique, en considérant les fortifications Séré de Rivières comme un objet d'étude central pour analyser l'impact environnemental et les implications patrimoniales de la guerre en géomorphologie, dans la dimension de la fortification permanente. Plus précisément, le but de ce projet est d'étudier en quoi l'analyse géomorphologique des fortifications Séré de Rivières, considérées comme des reliefs anthropiques, permet de reconstituer leur trajectoire morphologique et d'interpréter leurs héritages dans les dynamiques paysagères contemporaines.

Cette dimension géographique et morphologique est le cœur de cette recherche, partant du postulat qu'elle constitue une vraie plus-value scientifique en comblant certains angles morts des approches traditionnelles, notamment en documentant les processus matériels

de production, puis d'effacement et de persistance des formes, ce qui conditionne donc concrètement ce qui est visible aujourd'hui, et en adoptant un prisme paysager dépassant l'échelle des structures mêmes pour envisager leur relation à leur environnement.

L'approche méthodologique est interdisciplinaire et place comme médium central l'exploitation des données LiDAR aéroportées. Son caractère synoptique permet de créer une synergie entre les différentes disciplines évoquées, mobilisées en complément : l'archéologie et l'histoire, pour leurs méthodes et en raison de la nature fondamentalement historique de l'objet ; la géographie militaire et historique, pour décrypter le rôle de la géographie dans les caractéristiques de ces fortifications et les enjeux militaires associés ; ainsi que la géohistoire et l'aménagement du territoire, pour explorer leurs trajectoires paysagères, passées, présentes et futures.

Le secteur d'étude retenu correspond à la ceinture fortifiée de Reims, construite, entre 1875 et 1885, au droit des reliefs de la côte d'Île-de-France, et modernisée de manière mineure en 1891 et 1892. Cette ceinture comprend 7 forts et 5 ouvrages secondaires implantés dans un paysage rural agro-pastoral champenois, aujourd'hui transformé en un territoire dominé par la viticulture et l'agriculture intensive, où les forts demeurent isolés. Reims s'impose comme un terrain d'étude pour des raisons territoriales (financement du projet doctoral par le Grand Reims et l'URCA, soutien de l'AAFNA), académique (continuité des travaux du GEGENA ; fig. 0.1), scientifique (approche géomorphologique inédite des fortifications de Reims, couverture LiDAR de la moitié de la ceinture en 2015) et logistique. La proximité de la zone d'étude offre en effet une accessibilité accrue et limite les frais liés aux déplacements, ce qui constitue un facteur essentiel dans le cadre du projet SECREI, initialement financé par une allocation doctorale couvrant exclusivement la masse salariale.

Dans cette démarche, les travaux de Durup de Baleine (1998), intitulés « *Paysages hérités de la fortification « Séré de Rivières » au sein des côtes lorraines* », constituent une référence majeure par leur finalité géographique, leur approche paysagère et diachronique, leurs méthodes interdisciplinaires et les caractéristiques géomorphologiques du secteur étudié (relief de cuesta). Cette thèse s'inscrit dans cette tradition géographique nancéienne associant analyse paysagère et géohistorique, tout en se distinguant par l'importance centrale accordée à la géomorphologie des formes héritées des conflits, découlant de l'approche développée au sein du GEGENA. Elle met ainsi l'accent sur le cadre physique qui sous-tend la formation et l'évolution des paysages historiques et explore les interactions entre sociétés passées et environnement dans la préparation et la conduite de la guerre, en considérant les reliefs anthropiques comme des marqueurs historiques porteurs d'informations géographiques significatives.

À partir des données LiDAR aéroportées acquises sur l'ensemble des forts de Reims en 2015 (LiDAR IMPACT GEGENA) et 2023 (LIDAR HD IGN), les objectifs de la thèse sont (i) de caractériser les morphologies associées à ces ouvrages Séré de Rivières, fruit de l'hybridation entre topographie et fortification qu'induisent leur caractère sub-surfacique et le blindage en terre. Il s'agit également (ii) de mettre en évidence la morphogenèse de ces polémoformes, apparues à la fin du XIXe siècle puis modifiées à travers le temps jusqu'à produire le palimpseste topographique actuel. (iii) Ces fortifications, caractérisées par un ensemble de trajectoires territoriales éclectiques, couvrant un large spectre de situations allant de l'enruinement et l'abandon pur et simple, à la conservation et à la mise en valeur patrimoniale (Diest, 2022), revêtent par ailleurs un héritage protéiforme (*e.g.*, historique, bâti, souterrain, militaire, culturel, morphologique, biogéographique) aux enjeux multiples, patrimoniaux, écologiques, et cindynique qu'il convient de cerner. Enfin, (iv) un objectif méthodologique de ces travaux consiste à tester, sur cet objet d'étude atypique, une démarche méthodologique intégrée fondée sur les données géomorphologiques apportées par l'imagerie LiDAR et le croisement interdisciplinaire, afin d'envisager les apports pour une gestion patrimoniale raisonnée.

- ANNONCE DU PLAN

Ce manuscrit s'organise en six chapitres articulés autour de la compréhension géohistorique morphologique, environnementale et patrimoniale des fortifications Séré de Rivières.

Le premier chapitre propose un état de l'art élargi qui dépasse le seul cadre des fortifications. Il expose les concepts mobilisés pour construire le socle théorique employé dans l'étude des forts (chapitre 1).

Il est suivi d'un chapitre spécifiquement consacré au système Séré de Rivières, à savoir son histoire, des événements précurseurs jusqu'à la Première Guerre mondiale, sa logique d'implantation et son fonctionnement, ainsi qu'au fort de type 1874 ici étudié, qui sont des éléments indispensables pour situer la ceinture fortifiée de Reims dans le dispositif national (chapitre 2).

Le troisième chapitre présente le secteur d'étude, dans ses dimensions géographiques et historiques. Il établit les contraintes et les atouts environnementaux, ainsi que l'occupation du sol ancienne et actuelle, qui conditionnent la problématique scientifique et la mise en œuvre de la méthode. Il présente par ailleurs l'histoire locale de la ceinture, des premières fortifications du secteur à la mise en place des forts de Reims, puis à leur abandon, afin d'être en mesure d'interpréter les traces géomorphologiques et archéologiques associées (chapitre 3).

Le quatrième chapitre décrit la méthodologie interdisciplinaire élaborée pour cette recherche. Il repose sur l'exploitation géomorphologique des données LiDAR, complétée par des apports géohistoriques, archéologiques, biogéographiques et géoscientifiques (chapitre 4).

Les résultats sont ensuite présentés en deux volets complémentaires. Le premier concerne l'analyse morphologique et morphométrique menée à partir du LiDAR (chapitre 5), organisée selon trois ensembles : morphologies des fortifications Séré de Rivières, polémoformes de la Première Guerre mondiale et autres formes archéologiques. Le second volet mobilise les données de terrain (étude des géomatériaux et de la végétation) et les archives pour replacer ces morphologies défensives dans une trajectoire paysagère de long terme et donc éclairer leur morphogenèse, ce qui permet finalement de discuter les apports comme les limites de l'approche en guise de perspectives de recherches (chapitre 6).

CHAPITRE 1 : CADRE CONCEPTUEL



Vue aérienne oblique du fort de Montbré (février 2025)

1. CADRE CONCEPTUEL

Cette thèse propose une grille de lecture géomorphologique des fortifications Séré de Rivières, déployée dans une perspective interdisciplinaire. Ces fortifications y sont considérées comme des reliefs artificiels, au sens de formes du relief produites, intentionnellement ou non, par l'action humaine. Cette approche permet d'en analyser la genèse, les matériaux mobilisés, les contraintes qui en contrôlent les formes, ainsi que les processus qui gouvernent leur évolution, lesquels relèvent principalement, à cette échelle temporelle, de dynamiques sociales et d'actions anthropiques.

Ce positionnement ne fait toutefois pas l'unanimité au sein des géosciences et de la géomorphologie, où la reconnaissance de telles formes comme objets géomorphologiques à part entière demeure discutée (Scammacca et Bétard, 2026). Ce chapitre vise donc à expliciter le périmètre scientifique de l'étude, à préciser les cadres conceptuels et disciplinaires mobilisés, et à poser les fondements théoriques sur lesquels repose la démarche adoptée.

L'organisation de ce chapitre s'articule en quatre temps. Le premier montre l'intérêt du paysage comme cadre intégrateur pour l'étude de la composante fortifiée du relief (1.1). Le deuxième replace l'approche géomorphologique développée dans le champ de la géomorphologie contemporaine, et plus particulièrement de la géomorphologie de l'Anthropocène, à travers ses dimensions anthropogéomorphologiques et archéogéomorphologiques (1.2). Le troisième présente les apports méthodologiques des données LiDAR aéroportées, qui constituent le cœur du dispositif analytique, notamment par leur capacité à révéler la topographie et les formes héritées à différentes échelles spatiales (1.3). Enfin, la dernière sous-partie est consacrée à la justification de l'objet de recherche et à la formulation des hypothèses qui structurent cette thèse (1.4).

1.1. Géomorphologie et fortification : le paysage comme cadre intégrateur

Dans cette thèse, l'analyse porte sur un paysage fortifié issu de la mise en place d'ouvrages de défense, appréhendé à travers une lecture géomorphologique centrée sur l'empreinte topographique, la morphogenèse et les trajectoires d'évolution des formes qui en résultent. Le paysage est ici mobilisé comme cadre intégrateur permettant d'articuler les formes du relief et les processus qui les produisent selon différentes temporalités, dans un contexte fortement anthropisé. Les sections suivantes reviennent d'abord sur les principales approches du paysage en géographie (1.1.1), puis introduisent le concept de paysage géomorphologique, entendu comme une manière spécifique d'observer et d'interpréter le paysage à partir de ses formes de relief et de leurs dynamiques (1.1.2). Cette progression conduit enfin à la définition du paysage fortifié comme objet d'étude, envisagé dans cette recherche comme une composante à part entière du paysage géomorphologique (1.1.3).

1.1.1. La polysémie du paysage

Le *paysage* constitue un concept central en géographie, dont la définition demeure polysémique et historiquement construite. Cette pluralité de sens renvoie à des traditions scientifiques distinctes, classiquement regroupées en trois grandes orientations (Rochel, 2016 ; De Matos-Machado, 2018) :

Une première approche, dite objectivante ou naturaliste, envisage le paysage comme un assemblage de formes matérielles imbriquées spatialement, mesurables et cartographiables. Elle s'inscrit notamment dans les prolongements de l'écologie du paysage (Antrop, 2000) et repose sur une vision synoptique et distanciée du territoire, renforcée par le développement de la photographie aérienne, de la télédétection et des systèmes d'information géographique à la fin du XXe siècle.

Une seconde approche, plus subjective et culturaliste, considère le paysage comme une construction sociale, centrée sur les perceptions, les représentations et les significations attribuées aux espaces par les sociétés humaines (Fischesser et Lambert, 1977).

Une troisième approche propose une lecture synthétique, dépassant cette opposition en considérant le paysage comme une interface entre sociétés et environnement (Bertrand, 1978). Cette conception, aujourd'hui largement partagée, est reprise par la Convention européenne du paysage (2000), qui définit le paysage comme « *une partie de territoire telle que perçue par les populations, dont le caractère résulte de l'action de facteurs naturels et/ou humains et de leurs interrelations* ».

Cette thèse s'inscrit dans cette approche globalisante, en s'appuyant plus précisément sur la conception développée par Rochel (2016), pour laquelle elle permet à la fois de prendre en compte la matérialité objective des formes et les biais inhérents aux représentations humaines, ce qui constitue une condition opératoire de l'analyse paysagère. Cette posture est particulièrement pertinente pour l'étude de paysages hérités, dont la compréhension repose sur des sources hétérogènes (archives, cartes, plans, photographies, données LiDAR) et dont l'interprétation est traversée par des biais cognitifs et de représentation ou méthodologiques.

Les approches strictement objectivantes ou strictement culturalistes apparaissent ainsi insuffisantes pour appréhender des paysages fortement anthropisés et techniquement construits, tels que les paysages fortifiés, qui résultent à la fois d'interventions matérielles massives sur le relief et de logiques socio-politiques et militaires inscrites dans le temps.

Cette position trouve un prolongement direct dans la notion de paysage géomorphologique, qui constitue le cadre analytique retenu dans cette thèse (Reynard, 2005 ; De Matos-Machado, 2018).

1.1.2. Le paysage géomorphologique

Le *paysage géomorphologique* se définit comme la portion du relief terrestre vue, perçue et parfois exploitée par l'Homme (Reynard, 2005). Dans la plupart des travaux paysagers, la topographie demeure reléguée au second plan, au profit d'objets situés en surface constituant la couverture du sol (végétation forestière et agricole, formes urbaines, *etc.*). Or, elle constitue la base matérielle sur laquelle s'organise l'architecture des territoires (Florinski, 1998). Elle représente par ailleurs l'un des conservatoires les plus pérennes de la mémoire des paysages, dès lors qu'elle n'est pas soumise à des usages destructeurs (Georges-Leroy et al., 2009). Les formes du relief conservent ainsi des traces sur des temporalités particulièrement longues généralement sous-estimées, issues de la combinaison des histoires géologique et morphodynamique (Reynard, 2005), et plus spécifiquement anthropique, l'ampleur des impacts géomorphologiques induits par les activités humaines étant désormais avérée (Goudie, 1993 ; Price et al., 2011).

Dans cette perspective, le paysage géomorphologique peut être envisagé comme un palimpseste de formes superposées, produites à des époques différentes et résultant de processus variés. Les couches naturelles de ce palimpseste sont relativement bien documentées, notamment à travers le concept de géodiversité, initialement défini comme la variété des éléments naturels non vivants de la planète, autrement dit comme l'équivalent abiotique de la biodiversité (Murray, 2013).

En revanche, les couches de formes anthropiques, bien que de plus en plus présentes dans les paysages contemporains, demeurent moins systématiquement intégrées aux cadres d'analyse géomorphologique. Ces formes peuvent être désignées dans la littérature sous des terminologies variées (reliefs anthropiques, reliefs artificiels, terrains artificiels, formations anthropiques, anthropo-reliefs ou anthrocavités, *etc.*), traduisant à la fois leur diversité génétique et les hésitations disciplinaires quant à leur statut.

Ces reliefs anthropiques peuvent relever d'activités agricoles, extractives, circulatoires, cadastrales ou artisanales, mais également d'activités militaires et conflictuelles. Dans ce dernier cas, ils résultent d'interventions souvent intentionnelles et massives sur le relief, mobilisant d'importants volumes de matériaux et produisant des formes durables. L'époque contemporaine occupe à ce titre une place particulière, en raison de l'intensité morphogène des conflits industriels, capables de perturber profondément les géosystèmes et de générer de véritables polémosystèmes (Amat, 2024), caractérisés par des morphologies spécifiques (Taborelli, 2018 ; De Matos-Machado 2018). Les traces géomorphologiques de la fortification, souvent ignorées au profit des polémoformes liées au combat, s'inscrivent dans ce continuum. Bien qu'elles ne soient pas nécessairement corrélatives à de violents conflits, elles témoignent, *a minima*, de la perception d'une menace ou d'une démonstration de puissance (Armit et al., 2007). À ce titre, elles constituent l'un des types de trace géomorphologique des conflits les plus répandus avant l'avènement des guerres industrielles et l'émergence d'une puissance de feu morphogène (Hesse, 2014).

Ainsi, envisager les fortifications comme des composantes du paysage géomorphologique revient à reconnaître leur rôle dans la production de formes du relief à part entière, inscrites dans des trajectoires morphologiques complexes. Cette posture ouvre la voie à une analyse géomorphologique des paysages fortifiés, fondée sur l'étude de leur morphologie, de leur genèse, de leur inscription spatiale et de leur évolution dans le temps.

1.1.3. Le paysage fortifié de Reims : du paysage de défense au paysage de guerre

La création de la ceinture fortifiée de Reims conduit à l'émergence d'un *paysage fortifié*. Contrairement au paysage de guerre, largement conceptualisé dans la littérature géographique (Amat, 1987, 1999, 2024 ; Boulanger, 2001 ; Asadpour, 2016 ; De Matos-Machado, 2018 ; Devos, 2024), le paysage fortifié ne constitue pas un concept aussi stabilisé sur le plan épistémologique.

En géographie, l'analyse des paysages de guerre s'est développée dès les années 1980, notamment à travers les travaux d'Amat, qui propose la notion de polémopaysage ou de polémosystème, définissant la guerre comme une entrée énergétique brutale bouleversant

l'équilibre ordinaire d'un géosystème (Amat, 1987, 1999, 2024). Cette approche systémique, notamment prolongée par De Matos-Machado (2018), Taborelli (2018) ou Devos (2024), repose sur une lecture diachronique distinguant un paysage d'avant-guerre, un paysage en guerre et un paysage d'après-guerre, et met l'accent sur les héritages morphologiques, écologiques et mémoriels laissés par les conflits.

Si ces travaux constituent un cadre de référence majeur, leur transposition directe au cas du paysage fortifié de Reims ne peut être effectuée, car il ne se structure pas prioritairement autour de la phase de combat, mais autour d'une mise en défense anticipée et durable, largement stabilisée sur le plan morphologique. La guerre, lorsqu'elle intervient, constitue un épisode ponctuel venant transformer un héritage morphologique préexistant.

Dans cette perspective, cette thèse propose de déplacer le discriminant central de l'analyse paysagère, en faisant de la fonction défensive, et non de la guerre, le principe structurant de la trajectoire paysagère. Le paysage de défense est alors défini comme le résultat de la planification et de l'aménagement du relief en vue d'une conflictualité potentielle, se distinguant à la fois des paysages directement façonnés par les combats et des formes plus générales de militarisation de l'espace (Asadpour, 2016).

Le paysage fortifié désigne ainsi l'expression matérielle et territoriale de ce paysage de défense. Il se traduit par une transformation volontaire et durable du relief et des matériaux, par des opérations de terrassement et de creusement mobilisant des volumes variables et modifiant la topographie locale. Ces aménagements s'inscrivent dans une organisation spatiale fonctionnelle d'ensemble, produisant des reliefs anthropiques pérennes, dont la morphologie, la distribution et les modalités d'évolution peuvent être analysées comme des formes du relief à part entière dans une perspective géomorphologique.

1.2. Approche géomorphologique de l'Anthropocène

L'étude des morphologies associées au paysage fortifié Séré de Rivières s'inscrit dans les questionnements contemporains de la géomorphologie de l'Anthropocène, entendu ici non comme un âge, une époque ou une période formellement définie (Gibbard et Walker, 2013), mais comme un événement en cours de transformation planétaire, rendant compte des altérations progressives, diachroniques et intensifiées du système Terre, résultant des interactions entre les sociétés humaines et leur environnement (Edgeworth et al., 2023). Deux enjeux structurent cette approche : d'une part, l'analyse des impacts environnementaux du fait militaire et de la guerre, relevant de l'anthropogéomorphologie (1.2.1) ; d'autre part, sur un plan archéogéomorphologique, les questionnements géopatrimoniaux relatifs au statut des reliefs anthropiques (1.2.2), envisagés comme des composantes potentielles de la géodiversité et du patrimoine géomorphologique (Bétard, 2017 ; De Matos-Machado, 2018).

1.2.1. Anthropogéomorphologie : étude des impacts environnementaux

L'étude des impacts morphologiques des conflits s'inscrit dans le champ plus large de l'évaluation des impacts environnementaux des conflits, qui mobilise un spectre disciplinaire étendu relevant de la géographie physique et des géosciences. Ces travaux concernent par exemple la biogéographie (Amat, 1987, 1999, 2024 ; Buridant, 2003), la pédologie (Parodi et al., 2024), l'hydrogéologie (Cao, 2020) et la géomorphologie (Hupy et Schaetzl, 2006, 2008 ; Devos et al., 2015, 2021 ; De Matos-Machado, 2018, 2024 ; Gheyle et al., 2018 ; Taborelli, 2018).

Dans ce cadre, l'analyse des paysages affectés par le fait militaire et la guerre relève pleinement de l'*anthropogéomorphologie*, entendue comme l'étude des modalités par lesquelles l'agent anthropique agit sur les reliefs (Goudie, 1993), ici par l'intermédiaire d'activités militaires et polémologiques.

Les premières réflexions portant sur l'influence des sociétés humaines sur les dynamiques environnementales apparaissent dès la fin du XVIIIe siècle et au XIXe siècle[2] (Goudie, 1993). Toutefois, ce n'est qu'à partir des années 1970, dans un contexte de prise de conscience environnementale globale (rapport Meadows, premier sommet de la Terre en 1972), que ces questionnements s'intensifient et se structurent autour de problématiques environnementales explicites.

[2] Par exemple, Humboldt s'intéresse à la variation du niveau de base du lac Valencia sous l'effet de l'anthropisation de l'occupation des sols (Goudie, 1993).

Le courant anthropogéomorphologique se formalise véritablement à partir des années 1980 et surtout 1990, parallèlement à l'émergence du consensus scientifique sur l'origine anthropique des perturbations environnementales, notamment climatiques, entériné par les travaux du GIEC. Il se matérialise en géomorphologie par des contributions majeures, en particulier celles de Goudie (1993), puis plus récemment par l'ouvrage de synthèse *Geomorphology in the Anthropocene* (Goudie et Viles, 2016). Ces travaux démontrent que les sociétés humaines constituent désormais un forçage géomorphologique majeur, capable de modifier durablement les dynamiques naturelles.

Néanmoins, les premières approches anthropogéomorphologiques accordent une attention limitée aux reliefs intentionnellement créés par l'Homme, lesquels relèvent longtemps davantage du champ de l'archéologie que de celui de la géomorphologie. Cette lacune commence à être comblée à partir des années 1990, notamment avec l'élaboration de classifications visant à intégrer les terrains artificiels dans les cadres géologiques et géotechniques. Le *British Geological Survey* (*BGS*) propose ainsi une première typologie des *artificial ground*, distinguant les terrains construits (*made ground*), excavés (*worked ground*), comblés (*infilled ground*), perturbés (*disturbed ground*) et remodelés (*landscaped ground*), typologie enrichie ultérieurement par Ford et al. (2010) avec une cinquantaine d'unités cartographiques (fig. 1.1). Il est également possible de citer les travaux du *Servizio Geologico d'Italia* (*SGI*), intégrant les formes anthropiques dans la légende des cartes géomorphologiques standardisées à l'échelle nationale (*forme antropiche* ; Campobasso et al., 2021).

Ces classifications répondent en partie aux enjeux contemporains liés à l'urbanisation et au renouvellement urbain (Dumont et Hellier, 2010), dans un contexte marqué en France par la politique de Zéro artificialisation nette à l'horizon 2050 (ZAN). Vraisemblablement, elles traduisent également des relations historiquement plus étroites entre géologie et géomorphologie dans certains pays. Les priorités scientifiques associées aux terrains artificiels varient toutefois selon les contextes nationaux. Alors que le cas britannique est fortement marqué par les héritages industriels, le Japon privilégie par exemple l'étude des *man-made strata* dans une perspective de stabilité géotechnique liée au risque sismique (Nirei et al., 2014).

En France, ces terrains artificiels demeurent relativement peu documentés et peu reconnus dans les cadres géomorphologiques usuels. Les cartes géologiques au 1/50 000 représentent les formations anthropiques de manière générique, sous forme de remblais notés « X » (fig. 1.2), et les tentatives de typologies plus détaillées, incluant notamment les anthrocavités, restent partielles et peu opérationnelles (Meilliez et Van Vliet-Lanoë, 2008). De plus, les morphologies liées au fait militaire et à la guerre sont souvent renvoyées vers le champ

archéologique, notamment dans les classifications patrimoniales anglo-saxonnes (Ford et al., 2010).

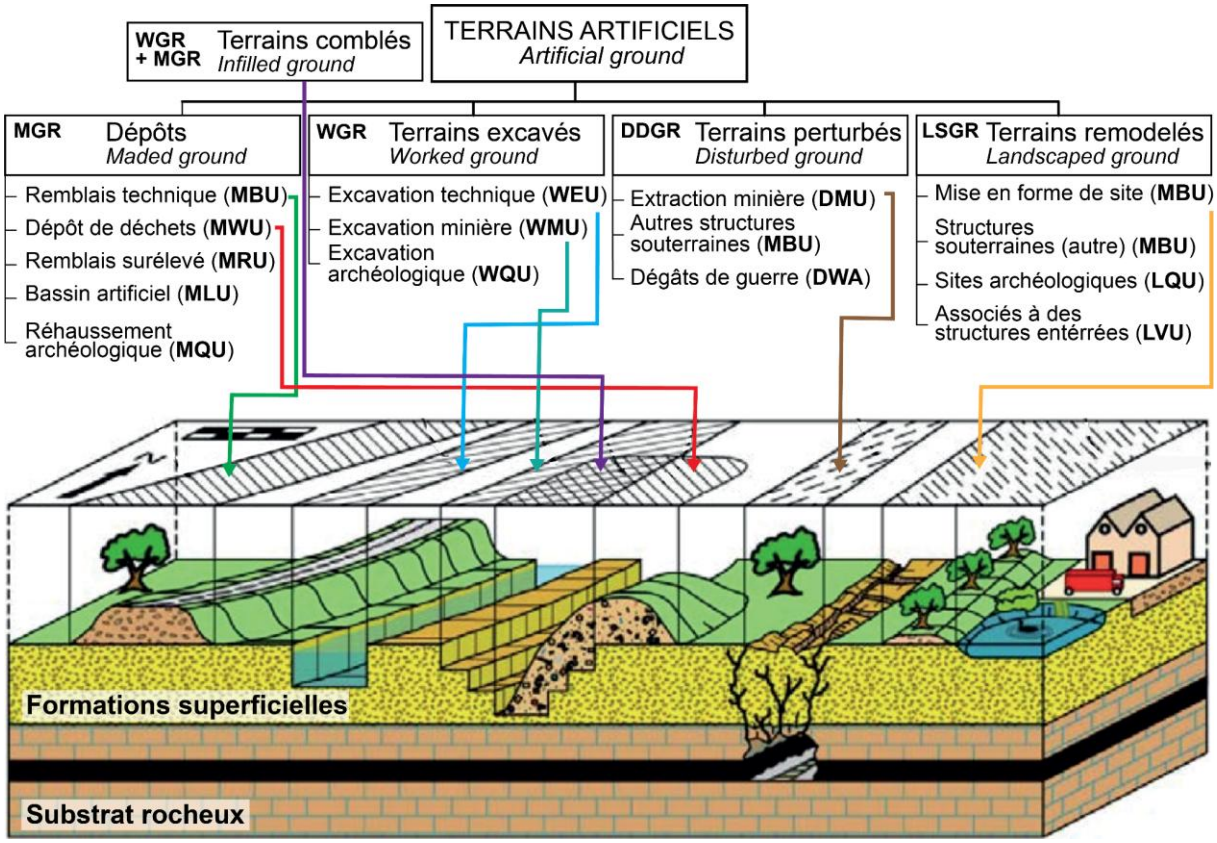


Figure 1.1 : Typologie des principaux types de terrains artificiels du BGS et de leur représentation sur la carte géologique (d'après Ford et al., 2010).

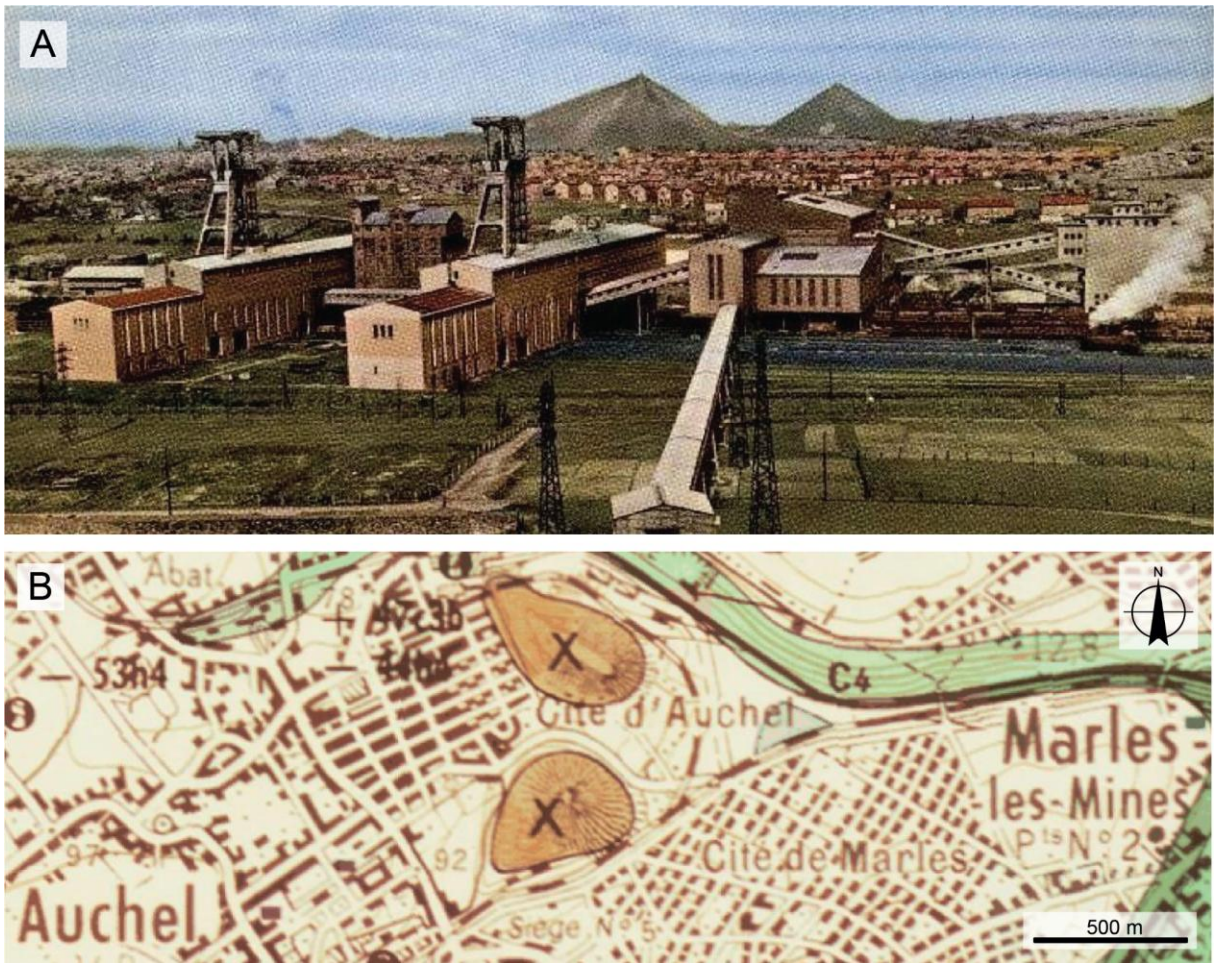


Figure 1.2 : Terrils de Marles-les-Mines (Hauts-de-France) constituant un exemple emblématique de terrains artificiels liés à l'industrie. A : Extrait de la carte géologique au 1/50 000 de Lillers (n° 18) ; B : Carte postale des terrils (source : Charbonnages de France, CC BY 1.0).

Dans ce contexte, une prise en considération explicite des polémoformes et des morphologies liées aux conflits apparaît particulièrement pertinente pour le cas français, marqué par plusieurs siècles de conflictualité et par une position géographique exposée aux routes d'invasion, dont les systèmes de fortification constituent un corollaire majeur. À la différence du Royaume-Uni, qui n'a pas connu d'invasion majeure depuis le XIe siècle et a été moins affecté par les conflits mondiaux, la France présente un héritage morphologique militaire particulièrement dense. Ce constat peut être étendu à l'ensemble des terrains artificiels, dont la reconnaissance géomorphologique demeure encore largement insuffisamment structurée.

Dans cette perspective anthropogéomorphologique, se pose ainsi la question de l'ampleur, de la nature et de la lisibilité des terrains artificiels associés aux fortifications Séré de Rivières de type 1874. La ceinture fortifiée de Reims constitue à ce titre un cas d'étude pertinent pour analyser les formes produites par le fait militaire en tant que composantes à part entière du paysage géomorphologique.

1.2.2. Archéogéomorphologie

En parallèle des approches centrées sur le forçage anthropique et les impacts environnementaux, l'*archéogéomorphologie* constitue un champ plus récent, dont les premières mentions apparaissent au début des années 1990 (Wandsnider, 1992). Thornbush (2012, 2013) conceptualise l'archéogéomorphologie comme une sous-discipline à ancrage géomorphologique, affirmée en démarcation de la géoarchéologie par une volonté explicite de se distancier du primat archéologique (absence de fouille, contribution périphérique aux problématiques archéologiques ; fig. 1.3). Dans cette perspective, le préfixe archéo- ne renvoie pas à la discipline archéologique au sens strict, mais à la dimension culturelle des reliefs produits par les sociétés humaines, qui constitue l'un des traits distinctifs majeurs de cette approche.

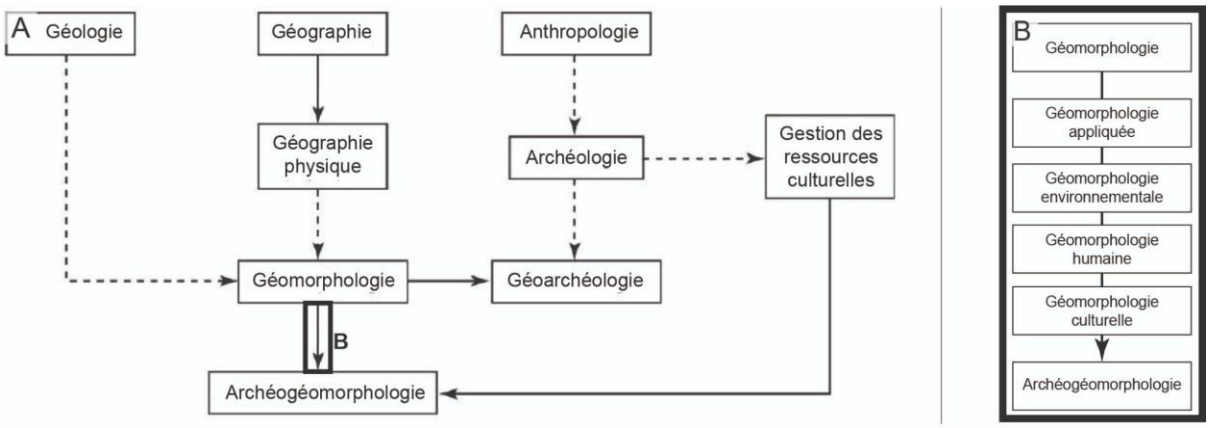


Figure 1.3 : Placement de l'archéogéomorphologie par rapport aux disciplines et sous-disciplines traditionnelles. A : Thornbush, 2012 ; B : Thornbush, 2013.

Cette distinction est centrale pour la présente recherche. Alors que la géomorphologie culturelle s'intéresse principalement à la valeur symbolique ou culturelle attribuée à des reliefs naturels, et que l'anthropogéomorphologie appréhende les formes anthropiques avant tout sous l'angle de la modification des systèmes naturels, l'archéogéomorphologie considère les reliefs créés ou transformés par les sociétés comme une expression matérielle de la culture humaine inscrite dans le paysage géomorphologique. Elle offre ainsi un cadre particulièrement opératoire pour analyser les interactions de long terme entre dynamiques socio-techniques et processus morphogéniques.

Cette acception a été reprise et développée par plusieurs auteurs, en particulier Hesse (2014), De Matos-Machado (2018) et Taborelli (2018) dont les travaux constituent aujourd'hui les contributions les plus structurantes mobilisant les données LiDAR dans l'étude des polémoformes. Ces recherches ont notamment conduit à l'élaboration de typologies morphologiques précurseurs, fondées sur l'analyse fine des formes héritées de la guerre et de leurs processus de formation (*cf. infra*). Dans ce cadre, l'usage du LiDAR

dépasse le simple apport méthodologique et s'inscrit explicitement dans une réflexion patrimoniale, interrogeant les conditions de reconnaissance et de gestion de ce « patrimoine sombre » hérité de la violence des conflits (« *dark heritage* » ; Biran et al., 2011).

Cette orientation trouve un ancrage théorique direct dans les réflexions géopatrimoniales développées depuis plus de deux décennies par les géomorphologues suisses (Reynard, 2005) et italiens (Panizza, 2001), puis prolongées en France par des chercheurs comme Hobléa (2024) et Bétard (2017). Ce dernier joue un rôle central en proposant une ouverture explicite du champ du patrimoine géomorphologique aux reliefs anthropiques, en les envisageant comme des composantes à part entière de la géodiversité (Scammacca et Bétard, 2026). C'est dans cette continuité que s'inscrivent les travaux de De Matos-Machado (2018), dont la finalité n'est pas seulement patrimoniale, mais résolument géopatrimoniale. Il interroge ainsi la pertinence d'intégrer les polémoformes au champ des objets géomorphologiques dignes d'être identifiés, gérés et transmis aux générations futures, dans un contexte où ces traces paysagères constituent « *le dernier être vivant* » de la Première Guerre mondiale (Boulanger, 2001). S'inspirant directement du cadre proposé par Reynard (2005), fondé sur la notion de géomorphosite (Panizza, 2001), cette approche repose sur l'identification d'un critère scientifique central propre à la géomorphologie, (*e.g.*, la singularité et la rareté des processus morphogénétiques), auquel peuvent s'agréger des valeurs complémentaires d'ordre écologique, culturel, mémoriel, économique ou territorial, induites par la dimension perceptive du paysage géomorphologique.

Cette dynamique géopatrimoniale témoigne d'un élargissement des cadres de réflexion au-delà du seul champ de la géographie, en raison même de la nature du concept de géopatrimoine. La prise en compte de valeurs additionnelles, scientifiques mais aussi culturelles, écologiques, mémorielles ou territoriales, favorise en effet une hybridation croissante des dispositifs de reconnaissance, de protection et de gestion, à l'interface du droit, de l'économie et de l'aménagement. Dans le domaine de la fortification, cette évolution se traduit par une approche plus compréhensive des valeurs plurielles des ouvrages, portée par une succession de démarches internationales issues de l'architecture, de l'urbanisme et du paysagisme, depuis les chartes fondatrices d'Athènes (1931), de Venise (1964) et de Florence (1981), jusqu'à la Convention européenne du paysage (2000) et à la Convention de Faro (2005).

Plus récemment, cette orientation se concrétise à l'échelle européenne à travers des initiatives telles que *Resilient Fortress*, fondées sur l'idée que la fortification ne peut plus être appréhendée uniquement comme une structure architecturale à restaurer mais comme un lieu de vie, de mémoire, d'interactions biologiques et sociales, dans un environnement à gérer durablement (Governing Body of Suomenlinna, 2024).

Dans cette perspective, et dans la continuité des réflexions proposées par Bétard (2017) puis par De Matos-Machado (2018), se pose la question de la valeur géopatrimoniale des fortifications Séré de Rivières de type 1874. Celles-ci constituent en effet des reliefs anthropiques hérités, porteurs d'une information morphologique, historique et environnementale, dont la reconnaissance dépasse les seules approches architecturales ou mémorielles.

L'archéogéomorphologie apparaît alors comme propice à l'articulation de ces différentes dimensions, en offrant une lecture intégrée des formes, de leur organisation spatiale, de leur processus de genèse et d'évolution, et donc de leur trajectoire paysagère. Elle fournit un socle conceptuel cohérent pour interroger la géopatrimonialisation des polémoformes et des morphologies associées aux conflits, tout en favorisant le dialogue entre disciplines.

Dans ce contexte, le recours aux données LiDAR aéroportées constitue un levier méthodologique central. Par leur capacité à révéler finement le modelé du relief, y compris sous couvert forestier, ces données permettent d'objectiver le forçage anthropique exercé sur le relief, d'en analyser les modalités morphogénétiques et d'accompagner, sur des bases géomorphologiques explicites, les processus de reconnaissance et de gestion de ces héritages.

1.3. La révolution du LiDAR en archéologie et en géomorphologie

Par sa capacité à restituer la topographie à haute résolution, le LiDAR aéroporté s'est imposé comme un outil central dans l'étude des formes et des dynamiques liées à l'anthropisation des reliefs, aussi bien en anthropogéomorphologie qu'en archéogéomorphologie. Initialement développé à des fins spatiales (mesure de distances astronomiques) puis militaires (détection d'aires d'atterrissage ou d'objets dissimulés), son appropriation scientifique s'est opérée de manière précoce en archéologie, avant d'être pleinement intégrée aux démarches géomorphologiques. À l'instar de la photographie aérienne verticale et oblique, dont Humbert et al. (2013) soulignent les apports, la distanciation et la vision macroscopique offertes par les relevés aéroportés favorisent, après interprétation, une meilleure compréhension des systèmes territoriaux anciens et des systèmes morphogéniques associés. Cette section présente d'abord les principes de fonctionnement du LiDAR (1.3.1), puis ses apports méthodologiques en archéologie (1.3.2), avant d'aborder plus spécifiquement son intégration récente en géomorphologie et dans l'étude des polémoformes (1.3.3).

1.3.1. Fonctionnement

Le LiDAR (*light detection and ranging*) est un outil de télédétection à capteur actif reposant sur l'émission d'une impulsion laser, sa réflexion sur un obstacle (sol, végétation, bâti) et la réception de l'écho correspondant (fig. 1.4). À la différence du sonar, fondé sur des ondes mécaniques, et du radar, utilisant des longueurs d'onde centimétriques, le LiDAR mobilise le domaine optique du spectre électromagnétique, principalement dans l'infrarouge proche. En contexte topographique, l'acquisition repose classiquement sur des vecteurs aéroportés (*airborne laser scanning*, ALS), capables de couvrir de vastes superficies par l'émission de centaines de milliers, voire de millions, d'impulsions par seconde. Le croisement du temps de parcours du signal lumineux avec la position précise de la plateforme, déterminée par GPS et centrale inertielle, permet de calculer la distance entre le capteur et la surface interceptée, et ainsi de localiser chaque point d'impact dans l'espace (Derouin, 2018).

Ce procédé aboutit à la production d'un nuage de points de haute à très haute densité. Alors que les premières acquisitions ALS se limitent à quelques points par mètre carré, les dispositifs actuels atteignent couramment plusieurs dizaines de points par mètre carré, et parfois plusieurs centaines dans le cadre du développement récent des vecteurs drones (*e.g.*, Stichelbaut et al., 2023). En parallèle, le LiDAR terrestre, qu'il soit stationnaire ou portatif, permet de scanner des environnements de proximité avec des densités bien supérieures, de l'ordre de plusieurs milliers à plusieurs dizaines de milliers de points par mètre carré. Cette diversification des vecteurs et des échelles d'acquisition a favorisé l'essor du LiDAR dans

un large éventail de disciplines, de la foresterie (Ben Sussan et al., 2022, 2024 ; Fareed et al., 2026) à l'hydrologie (Wu et Lane, 2017), de la climatologie (Kong et al., 2025) à l'urbanisme (Yan et al., 2015) et bien plus, à travers l'exploitation de différents types de modèles numériques d'élévation.

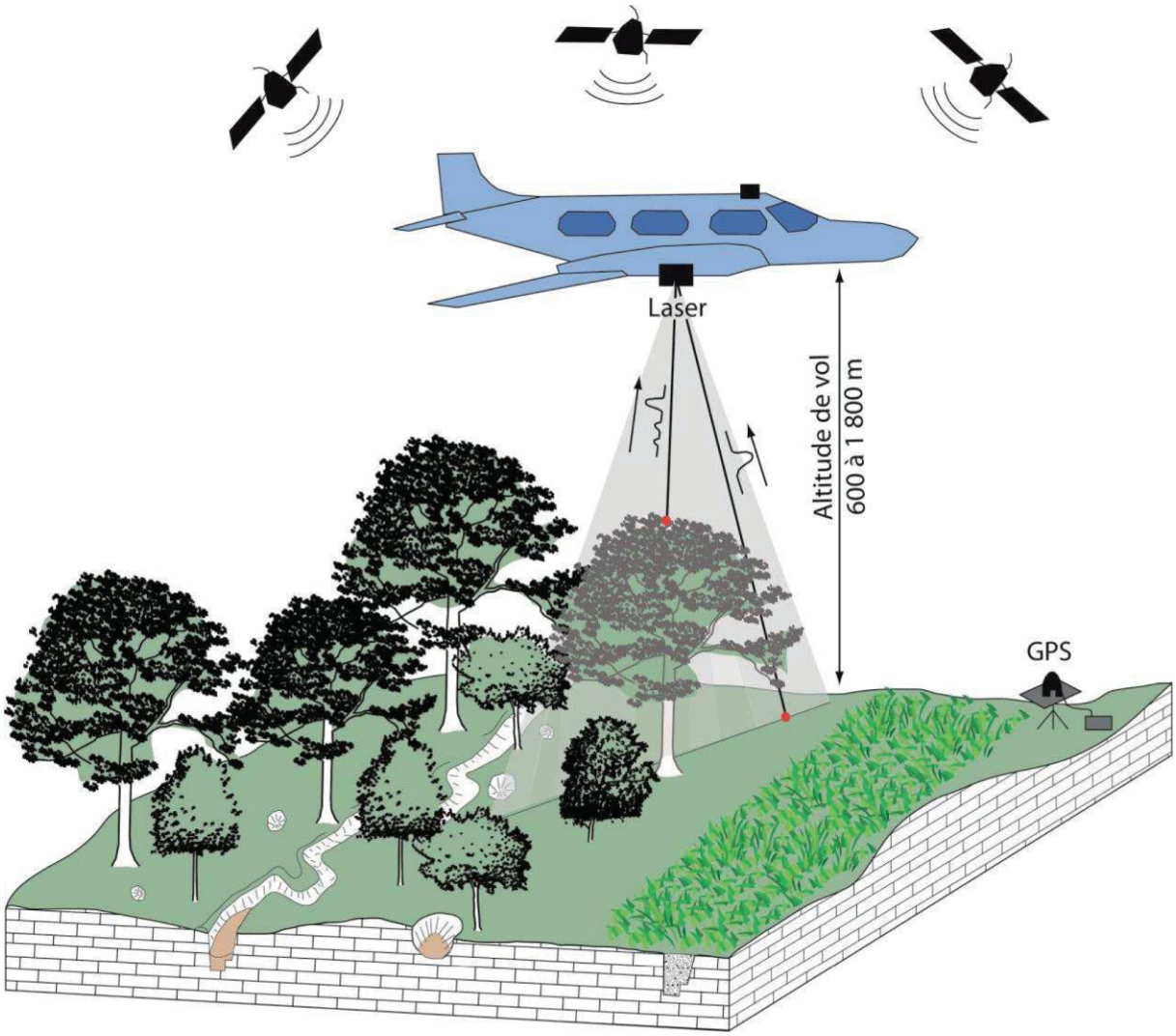


Figure 1.4 : Fonctionnement du LiDAR aéroporté (Taborelli, 2018).

1.3.2. LiDAR en archéologie

Dans les applications archéologiques et géomorphologiques, ces données permettent d'appréhender finement l'altitude et la morphologie des surfaces, soit directement à partir du nuage de points, approche de plus en plus fréquente (Štular et al., 2021a), soit par l'intermédiaire de MNT à très haute résolution, obtenus après classification et filtrage des points sol (Štular et al., 2021b). Cette capacité à restituer des micro-reliefs parfois imperceptibles sur le terrain constitue l'un des apports majeurs du LiDAR à l'analyse des paysages hérités et des formes anthropiques fossilisées.

Les premières expériences d'utilisation archéologique, notamment sur le site de Stonehenge au Royaume-Uni, suggèrent dès les années 1990 que « *le LiDAR a le potentiel de radicalement transformer notre compréhension et notre gestion futures de l'environnement historique* » (Bewley et al. 2005). La possibilité de « *voir à travers les arbres* », par la suppression numérique des volumes forestiers, conduit rapidement à considérer que « *le développement du lidar ouvre une nouvelle ère dans les études archéologiques* » (Devereux et al., 2005), comme l'illustrent également les premiers relevés réalisés sous couvert forestier dans le Pays de Bade en Allemagne (Sittler et Hauger, 2007). Ces avancées permettent la détection et la caractérisation de vestiges archéologiques aussi bien en milieu forestier qu'en espaces agricoles extensifs (*e.g.*, prairie), tout en améliorant l'efficacité de la prospection et de l'évaluation archéologiques et géoarchéologiques, contribuant ainsi à un renouvellement profond de la lecture des paysages (Crutchley et Crow, 2010 ; Challis et al., 2011 ; Georges-Leroy, 2013).

En réponse aux contraintes physiques, financières et réglementaires de la prospection traditionnelle, et dans un contexte d'intensification des pressions anthropiques et climatiques sur les vestiges, les levés LiDAR à très haute résolution facilitent l'accès à l'information archéologique et géomorphologique tout en limitant l'impact sur les sites étudiés (Schindling et Gibbes, 2014). Cela s'est par exemple vérifié dans l'inventaire des anomalies topographiques au sein du massif forestier de la Montagne de Reims majoritairement privé (Berthe et Ancelin, 2024).

Dans le cadre de cette thèse, la démarche d'exploitation des données LiDAR s'inscrit prioritairement dans l'héritage méthodologique de l'archéologie, en raison de la nature fondamentalement anthropique et culturelle de l'objet d'étude que constituent les fortifications Séré de Rivières, mais également du fait d'une maturité méthodologique aujourd'hui bien établie dans ce champ disciplinaire (Lozić et Štular, 2021).

L'exploitation et le traitement informatique des données LiDAR soulèvent toutefois des enjeux méthodologiques et interprétatifs majeurs. Au-delà des compétences traditionnelles de lecture topographique et de l'expérience de terrain, ils requièrent une maîtrise avancée des données numériques et le développement d'approches spécifiques (algorithmes, traitements, SIG), fondées sur une articulation étroite entre objectifs archéologiques et compréhension des processus de production des données (Opitz et Cowley, 2013).

À ce titre, les cadres méthodologiques d'exploitation du LiDAR sont désormais largement documentés (Lozić et Štular, 2021) et différentes chaînes opératoires ont été proposées, tant en France (Nuninger et al., 2010 ; Georges-Leroy et al., 2011 ; Ancelin, 2020 ; Ritz, 2020 ; Berthe, 2023), qu'à l'étranger (Crutchley et Crow, 2010 ; Fernandez-Diaz et al., 2014). Si aucun cadre normatif strict et unanimement partagé ne s'est encore imposé, une

convergence progressive des pratiques est néanmoins observable, portée notamment par le Conseil Archéologique Européen (*European Archaeological Council,* EAC), qui a récemment publié un guide de bonnes pratiques visant à harmoniser la suite d'opérations méthodologiques d'exploitation des données LiDAR en archéologie (Bennett et al., 2025).

De fait, plus de vingt ans après les premières applications, l'essor des levés topographiques à très haute résolution a conduit à une amélioration considérable des connaissances archéologiques, voire à un renouvellement profond des interprétations dans certains contextes forestiers (Costa et al., 2020). En France, les premières acquisitions sont réalisées dès 2007 sur des secteurs dispersés d'Alsace et dans la Forêt de Haye, à l'est de Nancy. Ce dernier site fait l'objet d'analyses visant à étudier l'organisation du parcellaire antique et les impacts des occupations anciennes par le croisement de données écologiques et archéologiques (Georges-Leroy et al., 2011). Depuis, de nombreux massifs forestiers ont bénéficié de couvertures LiDAR et d'approches pluridisciplinaires, comme la Forêt de Spincourt (Meuse), riche en traces d'occupations antiques (Ritz, 2020) ou les forêts charbonnées des massifs charentais (Rassat et al., 2015). Des travaux ont également porté sur l'histoire environnementale de massifs tels que la Forêt de Chailluz (Doubs ; Fruchart, 2014), la Forêt de Fontainebleau (Seine-et-Marne ; David, 2023), le Massif de Lorris (Loiret ; Riou, 2022), le Massif du Fossard (Vosges ; Ancelin, 2020 ; Kraemer et Ancelin, 2024) ou le Massif de la Montagne de Reims (Berthe, 2024 ; Berthe et Ancelin, 2024).

La prospection par LiDAR a démontré sa capacité à accroître significativement le nombre de structures détectées par rapport aux prospections pédestres ou à la photographie aérienne. Dans la Forêt de Haye, Georges-Leroy et al. (2009) mettent en évidence une augmentation de 50 % du nombre de vestiges identifiés dans des secteurs pourtant considérés comme bien prospectés, ainsi qu'une multiplication par 2,3 des linéaires cartographiés. De manière comparable Bennett et al. (2012) observent une augmentation de 37 % du nombre de structures archéologiques détectées sur un secteur de 4 km² du plateau de Salisbury Plain. Ces apports concernent également les formes naturelles, comme le montre l'étude menée en Montagne de Reims, où Berthe et al. (2022) identifient plus de 750 dépressions karstiques, soit 72 % de plus que celles recensées par prospection de terrain.

Dès lors, ces résultats convergent vers l'idée que l'absence apparente de vestiges dans certains massifs forestiers relève davantage d'un déficit de prospection, lié aux difficultés d'accès, de visibilité ou de cartographie, que d'une réelle absence d'occupations anciennes ou de l'existence de déserts archéologiques (Georges-Leroy, 2013).

Forte de ces capacités, le LiDAR aéroporté est utilisé de manière croissante en archéologie des conflits, principalement concernant le front de l'ouest pendant la Première Guerre

mondiale (Desfossés et al., 2016 ; Gheyle et al., 2018 ; Ritz et Sztuka, 2020), mais également le front de l'est (Zalewska et Kiarszys, 2021) ou la Seconde Guerre mondiale (Stichelbaut et al., 2023). L'intérêt pour l'information topographique est partagé par les recherches menées en géomorphologie sur les morphologies héritées des conflits, dont les polémoformes.

1.3.3. LiDAR en géomorphologie et dans l'étude des polémoformes

Bien que plus tardif, le développement du LiDAR en géomorphologie aboutit aujourd'hui à un panel d'applications variées, en particulier dans les contextes où la végétation ou les héritages anthropiques brouillent la lecture du relief (Tarolli, 2014). Cette technologie est par exemple utilisée dans l'analyse des glissements de terrain (Bollot et al., 2025), des processus de chenalisation (Arghavanian et Leloğlu, 2024), de la morphologie fluviale (Rosser et Jones, 2022), de la tectonique active (Lin et al., 2013), des formes volcaniques (Kósik et al., 2022), ainsi que des signatures anthropiques inscrites dans le relief, dont l'étude se situe à l'intersection de l'archéologie et de la géomorphologie.

C'est notamment le cas pour l'étude des traces géomorphologiques des conflits. Dans la littérature francophone, ces empreintes sont désignées sous le terme de polémoformes (De Matos-Machado et al., 2016 ; Taborelli et al., 2017a, 2017b ; Taborelli, 2018 ; Devos et al., 2021), en continuité avec des travaux sur les polémopaysages (Amat, 1987, 1999). En Europe de l'Ouest, les traces les plus étudiées datent majoritairement de la Première Guerre mondiale, conflit emblématique de la guerre industrielle (Archer et al., 2002), dont l'étude a bénéficié d'un regain d'intérêt à l'occasion de son centenaire (Weinrich and Patin, 2022).

En 2014, l'article pionnier de Hesse souligne l'intérêt d'une approche paysagère utilisant les MNT dans l'analyse des morphologies issues des conflits passés, rappelant dans le même temps l'ubiquité et la variété de ces morphologies et l'importance des changements anthropogéniques intervenus sur le relief sous l'influence des conflits. Ce cadre méthodologique est confirmé par des recherches ultérieures, menées notamment sur leur impact géomorphologique (De Matos-Machado, 2018 ; Taborelli, 2018), leurs caractéristiques morphométriques (De Matos-Machado et al., 2019) ou leur organisation spatiale (Taborelli et al., 2017b), qui tirent parti des données microtopographiques à très haute résolution acquises grâce aux LiDAR aéroportés. L'apport de ces techniques, via la détection et l'inventaire cartographique, est également crucial pour la gestion délicate du « patrimoine sombre » (« *dark heritage* » ; Hesse, 2014). La détermination du degré d'effacement a par exemple été proposée concernant les tranchées de la Grande Guerre, avec des valeurs s'élevant à environ 40 % au sein de la Forêt Domaniale de Verdun (De Matos-Machado, 2018) ou à 30 % au sein du petit Massif de la butte de Brimont au nord

de Reims (Ancelin et al., accepté), lorsqu'il tend à être intégral en secteur agricole (Taborelli, 2018), suite aux opérations de remises en culture après-guerre (Devos et al., 2021).

À l'instar de l'archéologie des conflits, les recherches en géomorphologie des conflits se sont jusqu'à présent majoritairement concentrées sur les formes associées aux champs de bataille. Pourtant, la nature des polémoformes varie selon un gradient polémologique (De Matos-Machado, 2018), et leur position dans les réseaux de défense (Devos et al., 2015, 2019), incluant parfois des zones éloignées du front, comme l'*Hinterland* (Stichelbaut et al., 2009) ou les zones dites de « l'Arrière » et « des Étapes ». Elle diffère également par leur genèse (Hesse, 2014), qui peut être liée à des « *combats sans guerre* » dans le cadre d'entraînements (*e.g.*, camps d'instruction en charge de la formation des combattants aux tactiques de la guerre de tranchées ; Stichelbaut et al., 2009 ; Brénot et al., 2022) ou aux infrastructures de soutien logistique de l'effort de guerre (*e.g.*, voies de communication militaire, hôpitaux militaires, dépôts de munitions, camps de repos, centres de ravitaillement, sites d'extraction de géomatériaux, Perarnau et al., 2022).

Leur origine peut également être défensive, notamment dans le cadre de la fortification permanente, comme c'est le cas de la majorité des morphologies et polémoformes des époques préindustrielles, en raison de l'absence d'armements à forte puissance de feu morphogène (fig. 1.5 ; Hesse, 2014).

Les fortifications Séré de Rivières s'inscrivent pleinement dans ce champ d'étude, en tant que morphologies d'origine défensive relevant de la fortification permanente. Elles constituent des reliefs anthropiques intentionnels, produits par des opérations de terrassement et de creusement structurées par des contraintes tactiques et topographiques, et dont la lisibilité actuelle dépend fortement des processus d'effacement et de réutilisation (notamment sous couvert forestier). Dans ce cadre, le LiDAR offre un levier décisif pour objectiver leur empreinte microtopographique à l'échelle décimétrique, distinguer les formes héritées des transformations postérieures, et replacer ces morphologies dans une trajectoire morphogénétique et paysagère, permettant ainsi de dépasser une lecture strictement architecturale ou fonctionnelle de l'ouvrage.

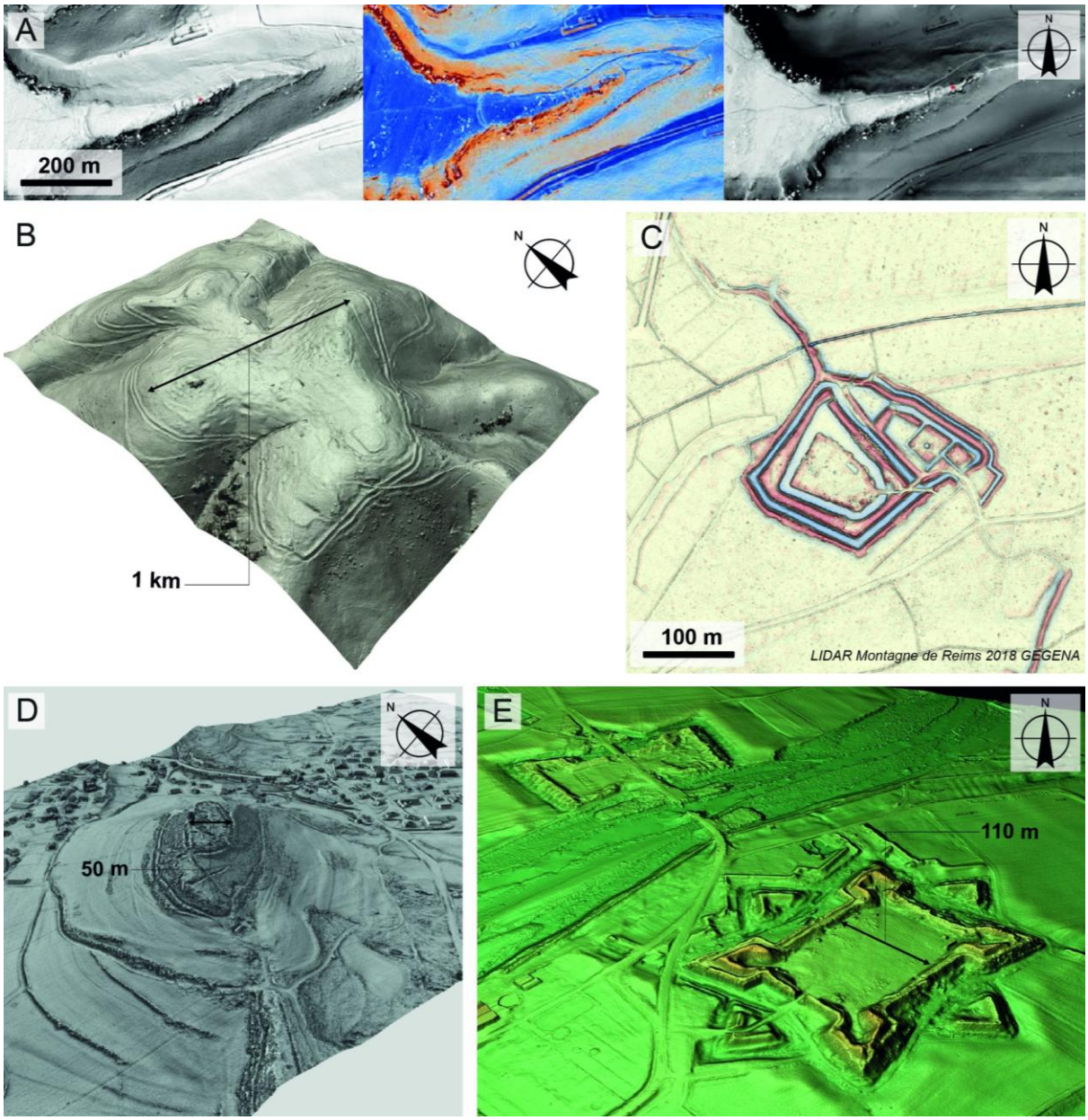


Figure 1.5 : Exemples de structures défensives de l'ère préindustrielle visibles au LiDAR. A : Éperon barré de Gevrey-Chambertin (Côte-d'Or, Néolithique moyen II, vers 3500 av. J.-C.) représenté via trois traitements de visualisation (de gauche à droite, ombrage, *Terrain Ruggedness Index*, *Visible Sky* ; Saligny, 2013) ; B : Mont-Beuvray (Nièvre et Saône-et-Loire, IIe et Ier siècles av. J-C., indice de pente en vue 3D ; Vidal, 2020) ; C : Château de Vernay (Marne, XIIe-XIVe siècles, superposition de l'indice de pente et du modèle de relief local par transparence) ; D : Château de Montrond (Doubs, XIIIe-XVIIe siècles, traitement de visualisation inconnu ; Vidal, 2023) ; E : Forts Carré (premier plan) et d'Alsace (arrière-plan) de Fort-Louis (Bas-Rhin, fin du XVIIe siècle, traitement de visualisation inconnu, Mark Walters).

1.4. Justification de l'objet de la thèse et hypothèses de recherche

L'objet de cette thèse répond d'abord à un angle mort disciplinaire. Les fortifications permanentes, pourtant génératrices de volumes terrassés et de formes durables, restent peu abordées comme reliefs en géomorphologie. À l'intérieur de cet ensemble, le système Séré de Rivières demeure encore plus marginal, alors même qu'il constitue une production morphogène standardisée et lisible dans la topographie actuelle. Traiter ces ouvrages comme des reliefs anthropiques permet donc de déplacer l'analyse, du vestige bâti vers la forme, ses matériaux, ses contraintes de construction et ses trajectoires d'effacement.

L'originalité tient ensuite à la manière d'aborder cet objet. L'étude repose sur une exploitation centrale du LiDAR aéroporté comme un outil d'analyse morphologique et morphométrique, capable d'objectiver des formes souvent invisibles au sol et de les replacer dans un palimpseste topographique, dépassant ainsi la conception d'un simple support de détection. Cette lecture est complétée par une analyse régressive de type géohistorique, mobilisant archives, plans, cartographies et photographies, afin d'interpréter la genèse et les transformations réaffectations successives. L'enjeu est de relier directement les morphologies observées aujourd'hui aux événements morphogènes qui les ont produites ou modifiées.

Le choix de la ceinture fortifiée de Reims renforce ce positionnement. Il s'agit d'un système de seconde ligne, rarement étudié en tant que tel, mais qui présente une configuration particulièrement intéressante, également rencontrée par Durup de Baleine (1998) au droit de la côte de Meuse : implantation sur les reliefs de la côte d'Île-de-France, contrastes lithologiques et topographiques propices à l'analyse des contraintes géomorphologiques, et réactivation partielle dans le cadre de la Première Guerre mondiale. La combinaison d'une défense permanente et d'un conflit industriel crée des conditions favorables pour étudier la superposition de processus anthropiques (terrassements, modernisations, destructions, démantèlements, remaniements agricoles ou forestiers) et leurs effets différentiels sur la conservation des formes.

Enfin, l'échelle temporelle mobilisée constitue un point structurant. Les forts s'inscrivent dans un temps historique court, tout en s'adossant à des cadres géomorphologiques hérités plus anciens (structure du relief de cuesta, héritages quaternaires, substrats et formations superficielles) qui conditionnent leur implantation, leur morphologie, leurs matériaux et leurs dynamiques d'évolution.

Dans ce cadre théorique et méthodologique, l'hypothèse directrice de cette recherche peut être formulée de la manière suivante : les fortifications Séré de Rivières de type 1874

peuvent être considérées comme des reliefs anthropiques à part entière, dont l'analyse géomorphologique permet de reconstituer les trajectoires morphologiques et donc d'expliquer leur lisibilité actuelle dans les paysages, ainsi que leurs implications territoriales contemporaines, notamment sur les plans géopatrimoniaux et environnementaux.

CHAPITRE 2 : DU SYSTÈME AU FORT SÉRÉ DE RIVIÈRES



Carte de la frontière franco-allemande (Niox, 1891)

2. DU SYSTÈME AU FORT SÉRÉ DE RIVIÈRES

Les forts de Reims, considérés comme des reliefs anthropiques, constituent l'objet central de ces recherches. La ceinture fortifiée de Reims s'intègre au sein d'un dispositif plus vaste, élaboré sous la conduite du général Séré de Rivières à l'issue de la guerre de 1870, dont la genèse, les principes et l'évolution restent mal connus en dehors des cercles spécialisés en histoire et en architecture militaires.

Le programme défensif, imaginé après 1871, s'inscrit dans le prolongement des grandes transformations du XIXe siècle. Les progrès de l'armement, des transports, des communications et de la cartographie, ainsi que la montée en puissance de la géographie militaire, redéfinissent progressivement les modalités de la fortification. Ces évolutions conduisent à intégrer de façon croissante les contraintes du terrain dans une logique systémique de défense, concrétisée par le système Séré de Rivières (Ancelin et al., 2023).

Afin de cerner ces modalités et le contexte dans lequel les forts de Reims ont été construits, ce chapitre propose une lecture historique, doctrinale, stratégique et morphologique, cette dernière permettant d'analyser les ouvrages comme des formes construites révélatrices des choix techniques et des logiques défensives. Il revient d'abord sur les mutations militaires, scientifiques et techniques du XIXe siècle (2.1), puis sur le contexte géopolitique et stratégique ayant conduit à la mise en œuvre du système (2.2). Une approche multiscalaire est ensuite adoptée pour examiner les principes fondamentaux du dispositif, sa structuration en profondeur et sa répartition territoriale (2.3), ainsi que les caractéristiques des ouvrages de type 1874 (2.4). Enfin, les limites de cette organisation défensive sont discutées à travers les mutations intervenues à partir du milieu des années 1880, qui modifient profondément la place des forts dans l'armée et leur rôle durant la Première Guerre mondiale (2.5).

2.1. Évolutions militaires, scientifiques et techniques au XIXe siècle

Les forts du système Séré de Rivières ne constituent pas une révolution en tant que telle, mais bien l'aboutissement d'un long processus d'évolution géopolitique, doctrinale, théorique et technique, notamment au cours du XIXe siècle, qui trouve sa traduction directe dans l'évolution de la fortification.

2.1.1. Héritages et remises en cause du système bastionné (XVIIIe - début XIXe siècle)

Depuis les premières formes de mises en défense pendant la Préhistoire, l'évolution de la poliorcétique (la science du siège militaire) suit une dynamique dans laquelle les progrès de l'armement précèdent presque systématiquement les adaptations défensives, compte tenu de l'inertie structurelle des systèmes fortifiés (Barde, 1996). À la fin du XVIIIe siècle, l'augmentation de la portée et de la puissance des canons incite De Montalembert (1776) à remettre en cause le modèle bastionné séculaire hérité de Vauban, au profit d'une fortification polygonale via la rédaction d'un traité. « *L'art défensif supérieur à l'offensif, ou La fortification perpendiculaire* », publié en onze tomes entre 1776 et 1796, marque une rupture dans un siècle (1715-1815) largement stagnant sur le plan de la fortification du fait d'une continuité doctrinale incarnée par des ingénieurs comme Cormontaigne (*e.g.*, fort de Bellecroix à Metz ; Rocolle, 1973). Montalembert théorise des ouvrages d'artillerie capables de fournir un puissant flanquement et envisage la possibilité de couverture mutuelle entre des forts, dès lors qu'ils seraient à faible distance les uns des autres (liaison par les feux). Cela aboutit à la conception d'une ceinture de forts se couvrant mutuellement et placée à bonne distance de la place pour la mettre hors de portée de l'artillerie : « *Augmentez et assurez le feu des flancs ; opposez à l'ennemi des obstacles puissants en dedans du grand fossé ; et si ces feux ainsi que ces obstacles sont tels qu'ils pourroient être, soyez tranquilles sur le sort des places* » (Montalembert, Tome I, Rocolle, 1973). Dès lors, la distinction entre le front d'attaque (ou front de tête), tourné vers l'orientation théorique de l'ennemi, et le front de gorge, ouverte sur l'arrière, où se situe l'entrée, est clairement établie.

Les guerres napoléoniennes consacrent l'obsolescence du système bastionné face aux progrès de l'artillerie et des techniques modernes de siège (*e.g.*, sièges de Dantzig en 1807, de Saragosse en 1808-1809). En France, l'expansion rapide du Premier Empire détourne l'attention des fortifications intérieures, ce qui entraîne le délabrement des places fortes du Pré Carré de Vauban, qui ne sont ni entretenues ni modernisées (Barros et al., 2022). Lors de la Campagne de France (1814), ces forteresses échouent à freiner l'avance des coalitions alliées, révélant leur obsolescence stratégique. Le Maréchal de camp Noizet, directeur des

fortifications et auteur d'un « *Traité complet de fortification* » note dès 1815 que les « *places [françaises] tombaient en ruine, plusieurs étaient ouvertes, quelques-unes étaient même pour ainsi dire effacées [...]* » (Rocolle, 1973). Si les idées de Montalembert restent ignorées de son vivant, elles préfigurent pourtant l'avènement de la fortification polygonale détachée, qui se diffuse pendant la première moitié du XIXe siècle, comme en témoignent le fort américain de Pulsaski (fig. 2.1A), la place de Vérone en Italie (fig. 2.1B) ou les places de Cologne (fig. 2.1C) et de Coblence en Prusse.

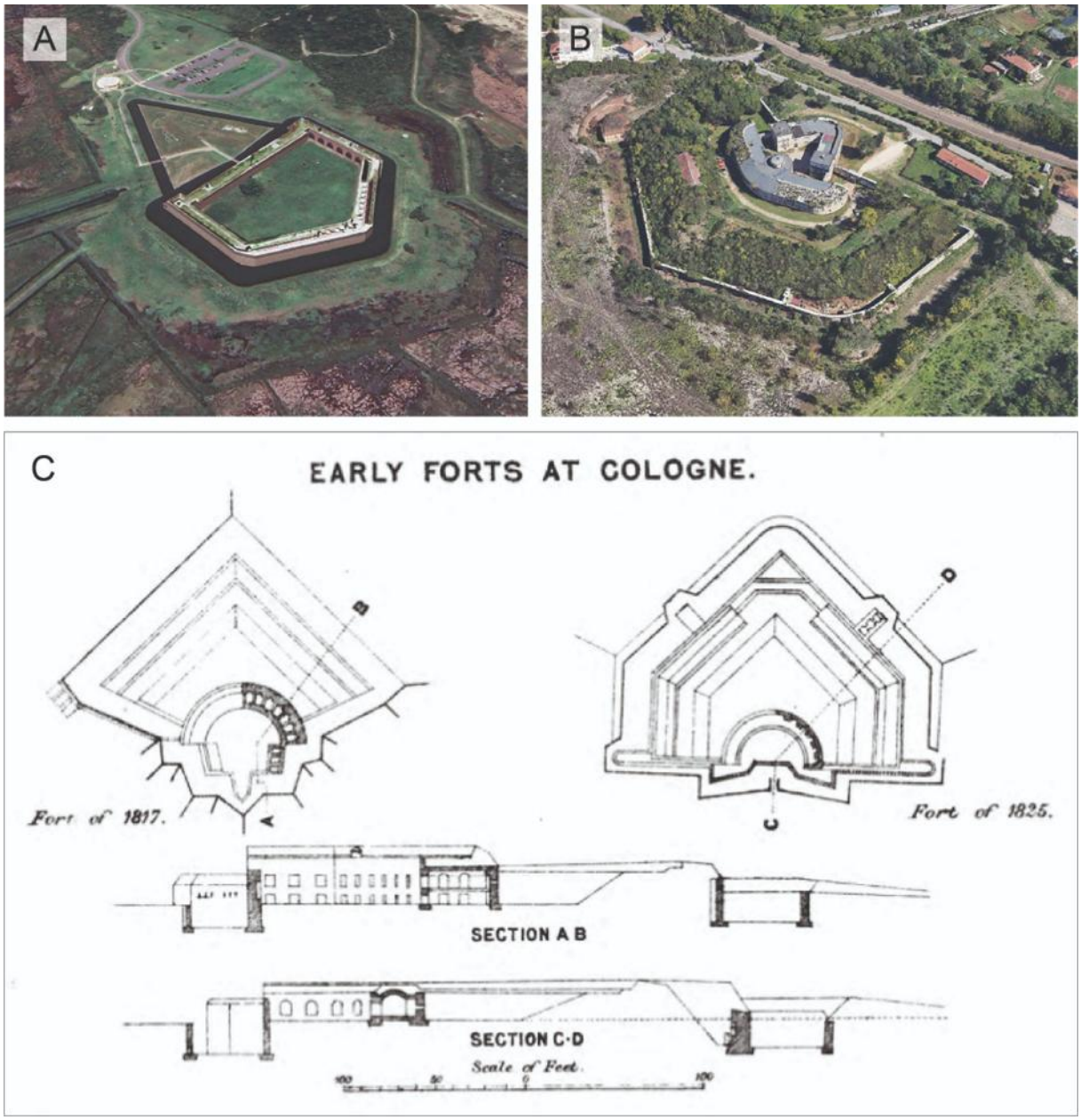


Figure 2.1 : Exemples de fortifications polygonales détachées, édifiées dans la première moitié du XIXe siècle. A : Fort Pulaski construit en 1829-1847 sur le littoral géorgien aux États-Unis pour protéger la ville de Savannah (Google Earth Pro) ; B : Fort Chievo édifié au sein de la place de Vérone en Italie entre 1850 et 1852 (Google Earth Pro) ; C : Plan et élévation de deux premiers types de forts polygonaux à Cologne, construits en 1817 et 1824 (British War Office, 1893).

2.1.2. La première moitié du XIXe siècle : entre conservatisme français et innovations étrangères

Pendant cette période, la France se distingue par un conservatisme marqué. Aucun traité novateur n'est publié sous la Restauration ou la Monarchie de Juillet (Rocolle, 1973), et les grands chantiers de Paris et Lyon prolongent l'héritage bastionné avec des enceintes continues doublées de forts détachés (13 autour de Lyon, 16 autour de Paris ; fig. 2.2A-E). Sous l'impulsion de figures comme le général Haxo et le capitaine Noizet (fils du Maréchal de camp), le Génie militaire continue ainsi à privilégier les enceintes continues intégrant demi-lunes et contre-gardes au détriment d'une véritable systématisation des forts détachés (Ortholan, 2023). En revanche, de nombreuses réflexions stratégiques sont menées sur le rôle des fortifications dans la défense du territoire (*e.g.*, Poitevin de Maureilhan en 1818 cité par Rocolle, 1973 ; Michaud d'Arçon, 1795 ; De Jomini, 1838). Elles se concrétisent au sein des états-majors français par la création de deux commissions de défense temporaires en 1818-1821, afin de reconsidérer la défense du royaume après le Traité de Paris (1815), puis entre 1836-1840, qui décide notamment de l'enceinte de Paris dite « ceinture Thiers ».

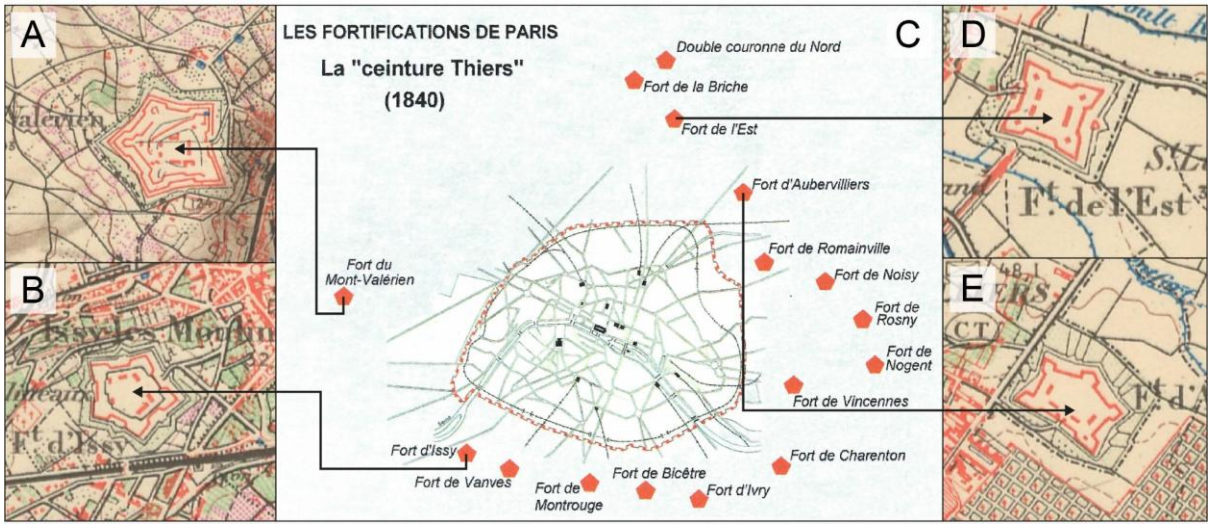


Figure 2.2 : Premières fortifications construites autour de Paris au XIXe siècle (source des cartons : extrait de la carte topographique type 1900, Géoportail). A : Fort du Mont-Valérien (1840-1846) ; B : Fort d'Issy (1840-1846) ; C : Plan de la « ceinture Thiers » (1840 ; Ortholan, 2023) ; D : Fort de l'Est (1841-1843) ; E : Fort d'Aubervilliers (1843-1846).

Dans un contexte de tension géopolitique croissante, la France perçoit un encerclement stratégique, qui motive également la fortification de ses frontières suisses (*e.g.*, Belfort, Besançon), piémontaises (*e.g.*, Grenoble, Briançon) et espagnoles (fort du Portalet), ainsi que de son littoral (*e.g.*, batteries de côte type 1846 à Cherbourg, Lorient, Brest, Toulon ; annexe 1 ; Ortholan, 2023).

2.1.3. Mutations balistiques et inflexion doctrinale sous le Second Empire

À partir du Second Empire, la doctrine du Génie évolue à la lumière des enseignements tirés des conflits contemporains, notamment le siège de Sébastopol (Guerre de Crimée, 1853-1856), et des expérimentations menées sur les effets des nouveaux armements. L'apparition de l'artillerie rayée à la fin des années 1850 marque une rupture majeure. L'adoption du système de La Hitte en 1858 formalise cette transition technologique dans l'armée française, qui révolutionne les tirs par l'introduction d'obus cylindro-ogivaux, toujours alimentés par la poudre noire, mis en rotation par des rayures hélicoïdales à l'intérieur des tubes de canon (fig. 2.3 ; Rocolle, 1973). Ces pièces augmentent la portée (plus de 2 000 m pour une pièce La Hitte de 4 kg contre 1 500 m pour une Gribeauval équivalente ; Ortholan, 2023), améliorent la précision et permettent l'usage du tir courbe, capable d'atteindre des cibles abritées derrière un parapet ou un remblai. Les essais réalisés sur le fort Liédot (Charente-Maritime ; 1863-1864) illustrent cette démarche et confirment la vulnérabilité des fortifications traditionnelles (Pommier, 2016 ; SHD GR 2V183), remettant ainsi en cause l'efficacité de la double ligne de fortifications de Vauban protégeant la frontière du Pré Carré français. Ce constat conduit le Génie, dont l'obsolescence du système bastionné est formellement actée par Noizet, successeur d'Haxo alors devenu général, à orienter ses efforts vers de nouvelles solutions architecturales.

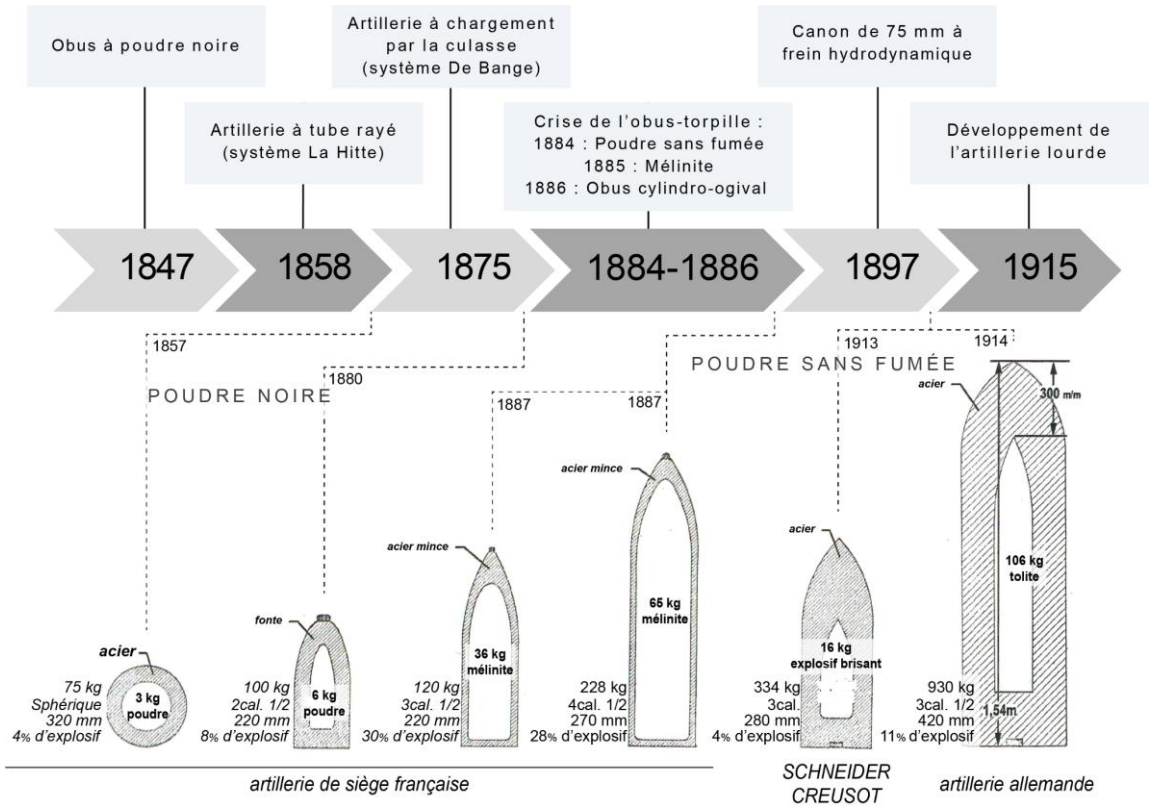


Figure 2.3 : Jalons de l'histoire de l'artillerie et évolution des plus gros obus destinés à l'attaque de la fortification de 1847 à 1917 (d'après Dépret, 2016 et Montigny, 1937).

Dans les faits, cette remise en cause se traduit par la mise en casemate des pièces d'artillerie (casemate Haxo ; fig. 2.4), par le renforcement de la protection des magasins à poudre, ainsi que par l'éloignement de 3 à 4 km des ouvrages (Rocolle, 1973).

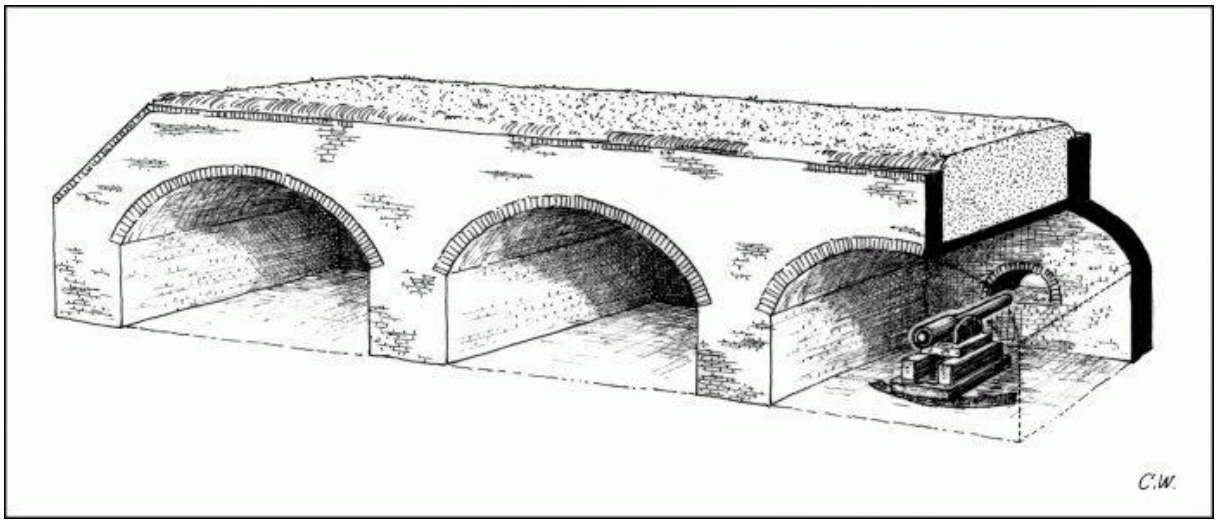


Figure 2.4 : Coupe d'une casemate à trois positions d'artillerie de type « Haxo » (Service du Génie, XIXe siècle, via Wikimedia Commons).

La victoire prussienne à Sadowa contre l'Autriche (3 juillet 1866) marque un tournant géopolitique majeur. En bouleversant l'ordre établi par le Congrès de Vienne, elle met fin

à l'équilibre européen et contraint la France à repenser son dispositif défensif. La montée des nationalismes et la militarisation stratégique de la Prusse accentuent cette pression. Bien que la fortification ne constitue pas la priorité du maréchal Niel, alors ministre de la Guerre, plusieurs projets sont lancés sous l'impulsion du Comité des fortifications (créé en 1791), notamment à Belfort, Langres et surtout Metz (fig. 2.5A-B), dont la défense devient centrale dans les plans de concentration précédant le conflit (Rocolle, 1973).

Huit forts sont initialement projetés à Metz par le Comité des fortifications, au moment où Séré de Rivières occupe les fonctions de chef du Génie local. Comme à Langres et Belfort, où les réalisations demeurent partielles, seuls quatre forts verront le jour dans la capitale mosellane pour des raisons budgétaires (Rocolle, 1973 ; Truttmann, 2017) : Saint-Julien et Queuleu à l'est, Diou et Plappeville à l'ouest (fig. 2.5A-B). Ces ouvrages diffèrent de ceux de Paris et Lyon par plusieurs caractéristiques : plus grand éloignement de la ville (environ 3 km), présence d'un cavalier central, casernements, larges fossés et profils plus fins. Ils constituent un jalon annonçant, à petite échelle, les standards du futur système que Séré de Rivières développera après 1870, dans un contexte profondément bouleversé par la défaite française face à la Prusse.

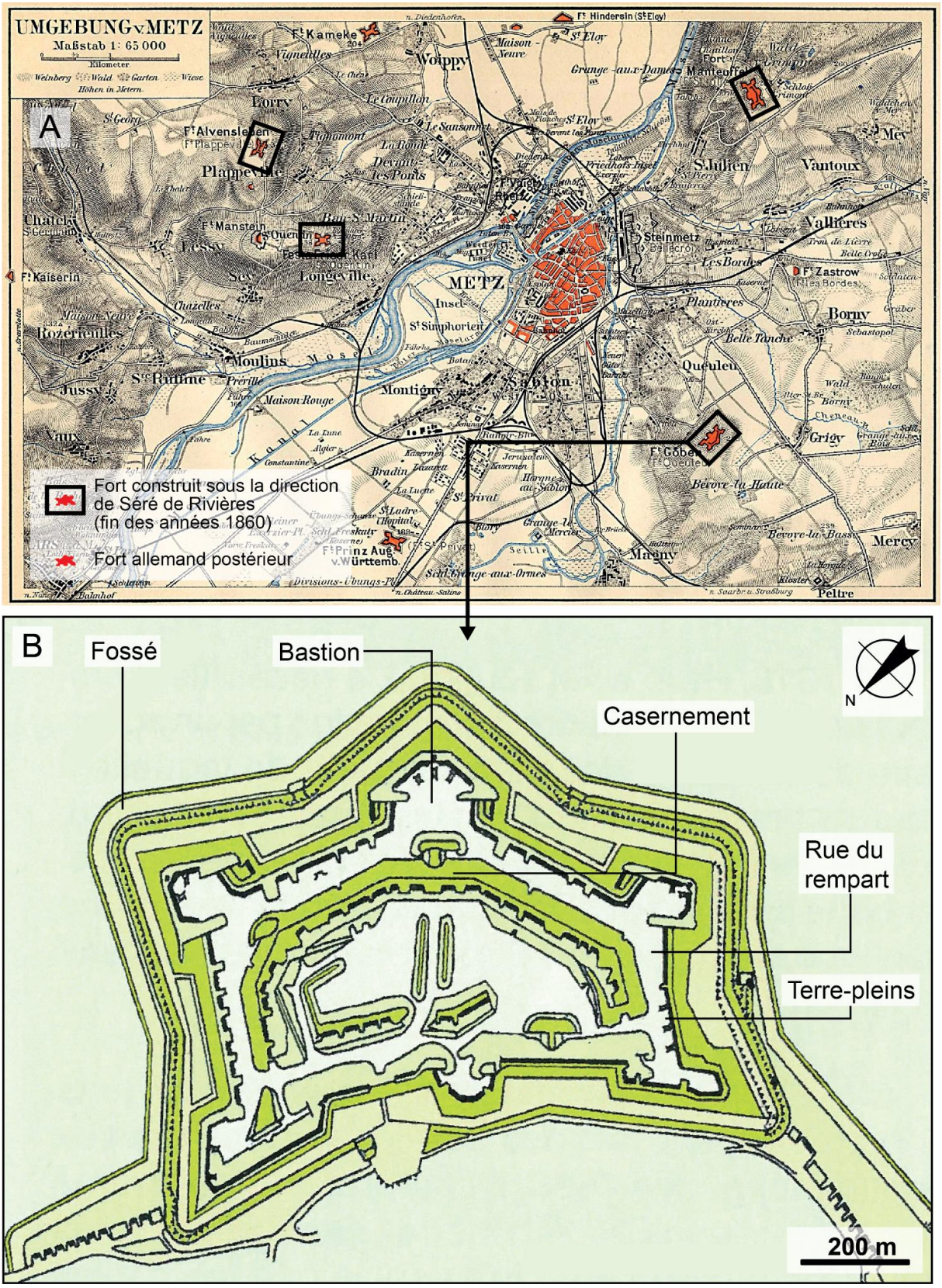


Figure 2.5 : Ouvrages de fortification engagés sous le Second Empire (1867-1870), sous la direction du Génie français, alors placé sous l'autorité de Séré de Rivières, et restés inachevés à la veille du conflit franco-prussien. A : Carte des environs de Metz présentant la ville et sa ceinture de forts vers 1900 (Meyer, 1908) ; B : Plan du fort de Queuleu (d'après Ortholan, 2023).

2.2. Contexte politico-militaire de la guerre franco-prussienne et naissance du système

La guerre franco-prussienne (1870-1871) constitue l'événement fondateur qui déclenche la mise en place du système Séré de Rivières. Du point de vue de la fortification, elle entérine définitivement l'obsolescence des anciennes enceintes bastionnées et la vulnérabilité des ouvrages encore en construction. D'un point de vue géopolitique, elle entraîne la perte de l'Alsace-Lorraine et impose à la France un redressement militaire sans précédent. L'étude de ce contexte, marqué par l'échec des fortifications traditionnelles et la défaite de l'armée impériale, ainsi que par les bouleversements politiques et sociaux de 1871, permet de comprendre les conditions dans lesquelles émerge une nouvelle doctrine défensive (Rocolle, 1973).

2.2.1. La guerre franco-prussienne : faillite du système défensif et bouleversements de 1871

Pendant la guerre de 1870-1871, l'avancée allemande vers Paris engendre 23 sièges, visant tant les anciennes places fortes de Vauban (*e.g.* Strasbourg) que des fortifications plus récentes (*e.g.*, Metz, Paris ; fig. 2.6 ; Rocolle, 1973). Dans la plupart des cas, la défaillance morale des défenseurs s'accompagne d'une perte de capacité opérationnelle, liée à un commandement vieillissant, à des troupes peu expérimentées (gardes nationaux) et à un matériel obsolète (un tiers seulement de pièces rayées, affûts vétustes ; Truttmann, 2017). Seules Bitche et Belfort, effectivement assiégées, résistent jusqu'à l'armistice. Le siège de Belfort apparaît comme l'un des rares exemples tactiquement positifs (Rocolle, 1973). Le général Denfert-Rochereau y applique une défense en profondeur, en plaçant des troupes dans les zones d'obstacles avancées (bois, villages), combinant fortifications permanentes et ouvrages de campagne, principe qui inspirera directement Séré de Rivières.

Ces sièges révèlent surtout l'inadaptation morphologique des systèmes défensifs bastionnés face à l'évolution de l'artillerie. Les profils massifs, les courtines continues et les bastions en saillie conçus pour flanquer l'espace devant les remparts, se montrent désormais vulnérables aux tirs plongeants et courbes de l'artillerie rayée, capables de frapper les défenses depuis des distances accrues. Ce contraste entre la puissance de feu moderne et la lenteur des évolutions défensives confirme le décalage structurel entre progrès offensifs et adaptation fortifiée, favorisant l'adoption de formes plus basses, polygonales et dispersées pour limiter l'exposition aux trajectoires directes (Rocolle, 1973).

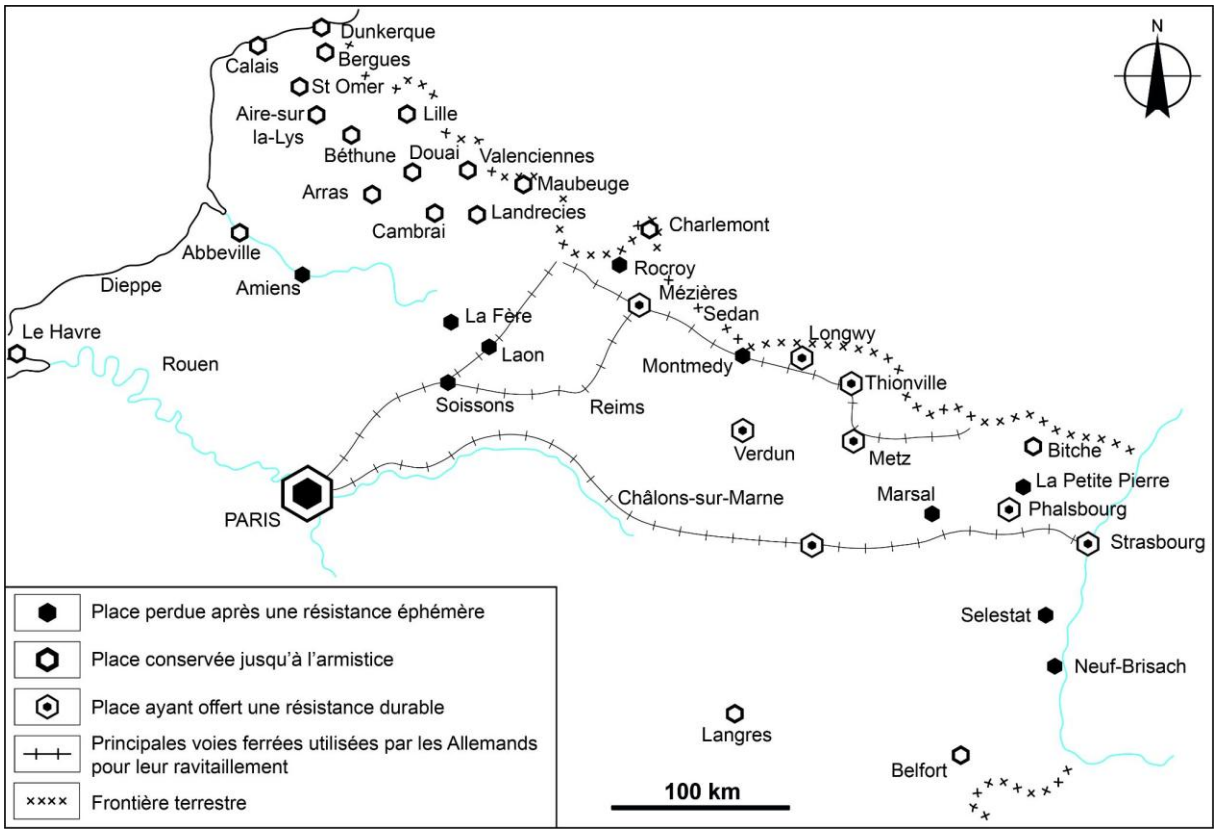


Figure 2.6 : Le réseau de fortification français pendant la guerre de siège en 1870-1871 (d'après Rocolle, 1973).

La guerre se termine en 1871, « *année terrible* » pour laquelle Truttmann (2017) pointe le « *solde catastrophique* ». Sur le plan territorial, l'armistice du 28 janvier est suivi de la signature du Traité de Francfort le 10 mai, entérinant l'annexion par l'Empire allemand de l'Alsace-Lorraine (*Elsaß-Lothringen*), comprenant le Bas-Rhin, le Haut-Rhin sans Belfort, la majeure partie de la Moselle, ainsi que des territoires périphériques aujourd'hui rattachés à d'autres départements, dont une large partie de l'ancienne Meurthe et les cantons vosgiens de Saales et de Schirmeck (fig. 2.7). Cette perte crée une brèche défensive de près de 300 km entre Longwy et Belfort, ouvrant la route vers Paris. Ce vide stratégique n'est pas seulement une frontière déplacée, mais une discontinuité spatiale majeure qui impose de concevoir un nouveau paysage fortifié.

Sur le plan financier, le traité impose également une indemnité de plus de 5 milliards de francs-or, dont le coût réel atteint environ 6 milliards en raison des intérêts sur l'emprunt, des paiements d'occupation et de contributions spéciales (notamment celle de Paris), s'élevant à près de 75 % du budget annuel de l'État et à 25 % du PIB (Manas et Couëtoux, 2020). Parallèlement, la défaite provoque un effondrement politique et social, car l'armistice déclenche la guerre civile de la Commune de Paris, tandis qu'en mars 1871, affaiblie et isolée diplomatiquement, la France doit également faire face à l'insurrection kabyle, qui dure sept mois (Truttmann, 2017).

Ce double constat, de faillite des fortifications traditionnelles et d'effondrement territorial et socio-politique, crée un traumatisme collectif, mais aussi les conditions d'un sursaut. Dès 1871, l'État et le Génie s'engagent dans un processus de refondation profonde, visant à reconstruire une armée moderne et à redéfinir un système défensif adapté aux nouveaux rapports de force. C'est dans ce contexte de redressement militaire et de réforme structurelle qu'émerge le système Séré de Rivières.

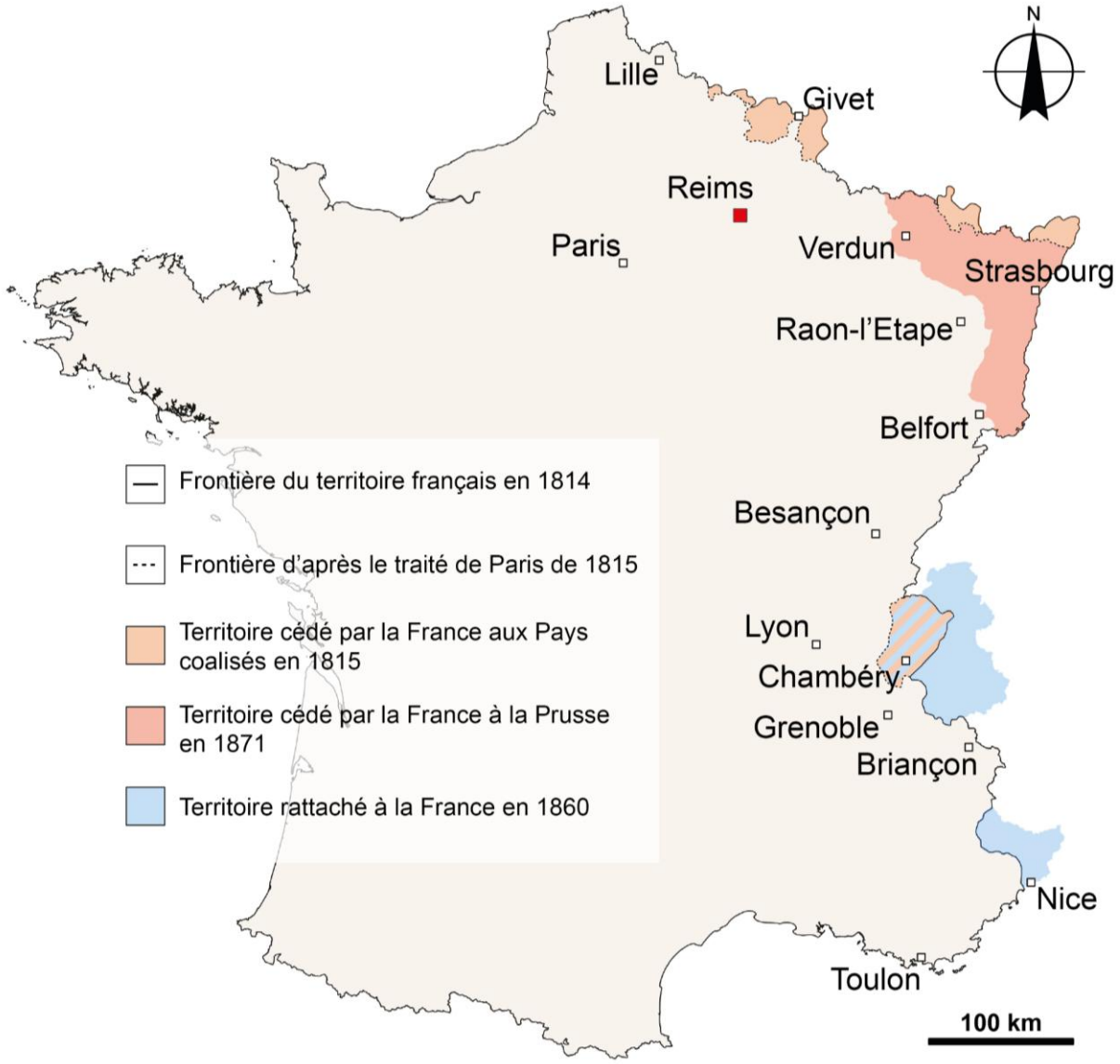


Figure 2.7 : Évolution des limites territoriales de la France au XIXe siècle (d'après Hertslet, 1875).

2.2.2. Redressement national : réorganisation militaire et contrôle territorial après 1871

La défaite de 1870-1871 face à la Prusse constitue un traumatisme national majeur, révélant l'obsolescence de l'armée de métier du Second Empire, tant sur le plan du commandement que de l'équipement. Ce choc inflige au territoire et à l'orgueil français des blessures profondes, mais suscite aussi un sursaut politique et militaire. Adolphe Thiers (1797-1877), chef du pouvoir exécutif après la chute de l'Empire puis premier président de la IIIe République (1871-1873), en devient le principal artisan, amorçant une vaste restructuration de l'armée française et la réorganisation de la défense nationale (Boniface, 2012 ; Truttmann, 2017).

Ce redressement s'accompagne d'une introspection collective, que Renan appelle dès 1871 dans « *La réforme intellectuelle et morale de la France* », qui vise à forger un esprit français nouveau, rationnel, discipliné et tourné vers le progrès scientifique et éthique, inspiré du modèle allemand. Digeon (1959) parle à ce titre d'une « *crise allemande de la pensée française* » pour qualifier cette confrontation permanente entre fascination et inquiétude vis-à-vis de la puissance prussienne. Si certains jugent cette idée excessive, elle n'en souligne pas moins l'empreinte réelle du modèle prussien, qui irrigue tant la pensée militaire et la réorganisation de l'armée que la société française après 1871 (Boniface, 2012). Le redressement national s'amorce d'abord sur le plan politique par la volonté de rompre rapidement avec l'emprise allemande. L'évacuation anticipée des troupes d'occupation, effective à Verdun en septembre 1873, et le remboursement accéléré de l'indemnité prévue par le traité de Francfort constituent les premières manifestations de cette résilience.

Sur le plan militaire, le Conseil Supérieur de la Guerre est créé le 27 juillet 1872 par décret présidentiel, la veille de la création du Comité de défense qui présidera à la reconstitution des défenses de la France (tab. 2.1 ; *cf.* partie 2.3.1).

Instances de gouvernance militaire	**Mission principale**	**Date de création**
Comité de Défense (+ sous-commission)	Réorganisation de la défense des frontières (Est) et système défensif ; sous-commission pour les décisions techniques	Décret du 28 juillet 1872
Conseil Supérieur de la Guerre	Conseil militaire supérieur : renforcement de l'armée, armement, fortifications, recrutement	Décret du 27 juillet 1872
Comité des fortifications	Conseil technique spécialisé	Loi du 10 juillet 1791

Tableau 2.1 : Principales instances militaires de gouvernance au lendemain de la guerre franco-prussienne.

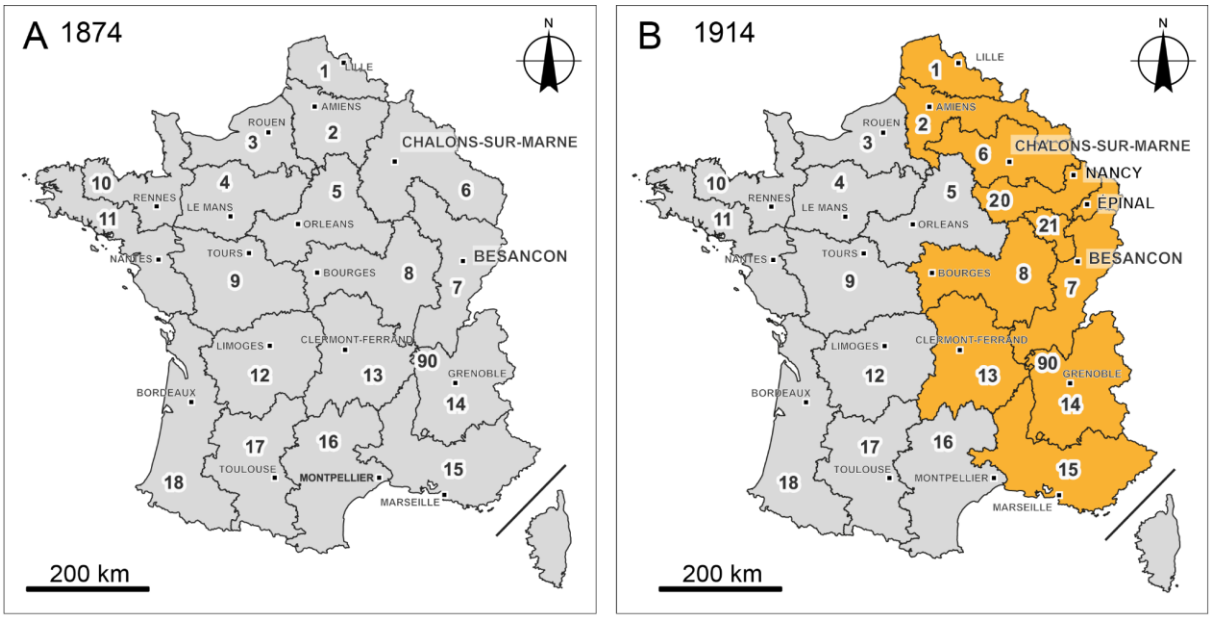
La Commission Jauréguiberry (19-26 février 1871) dresse un diagnostic sans appel mettant en évidence deux causes majeures. La défaite de 1870 est celle d'une armée désorganisée, dont un soldat sur deux seulement est jugé apte au combat, l'armée étant alors qualifiée « *d'embarras et source de désordre* » (Jauffret, 1999), et surtout celle d'un commandement « *médiocre* » incapable d'élaborer une stratégie cohérente pour contrer l'invasion allemande (Musée du Génie, sd.a).

Ces constats ouvrent la voie à la mise en place d'un véritable cadre législatif de réforme, notamment à travers la Commission de réorganisation de l'armée (Commission Chasseloup-Laubat). Trois grandes lois marquent ce processus, en jetant les bases sur lesquelles l'armée française fonctionnera jusqu'à la Première Guerre mondiale (Jauffret, 1999 ; Boniface, 2012) :

- La loi sur le recrutement (1872) : elle consacre le service militaire personnel obligatoire et fonde l'armée de masse, bientôt universalisée par la loi de 1889 (suppression du tirage au sort pour la majorité des classes), puis renforcée en 1913 par l'allongement du service à trois ans, permettant d'atteindre un équilibre d'effectifs avec l'Allemagne (environ 800 000 hommes en temps de paix, 3,5 millions après mobilisation).

- La loi sur l'organisation militaire (1873) : elle divise le territoire en 18 régions militaires (chacune dotée d'un corps d'armée et d'une organisation identique en temps de paix et de guerre), portées à 21 à la veille de la Première Guerre mondiale (création des XXe - Nancy, 1898 - et XXIe - Épinal, 1913 - régions face à la frontière allemande), traduisant une concentration stratégique des forces dans l'est (fig. 2.8A-C).

- La loi sur les cadres et effectifs (1875) : elle revalorise le corps des officiers et homogénéise les carrières, tandis qu'une série de réformes complémentaires modernise progressivement son organisation face aux évolutions doctrinales et technologiques jusqu'en 1914.



Décret du 6 août 1874	création de la XIXe RM (Alger)	C
Décret du 8 février 1898	dédoublement de la VIe RM (Châlons-sur-Marne) ; création de la XXe RM (Nancy)	
Décret du 6 septembre 1899	modifications apportées aux limites des VIIe RM (Besançon) et XXe RM (Nancy)	
Décret du 22 septembre 1913	modification des IIe (Amiens), VIe (Châlons-sur-Marne), VIIe (Besançon) et XXe RM (Nancy) dédoublement de la VIIe RM (Besançon) avec création de la XXIe RM (Epinal) *	

Figure 2.8 : Carte des régions militaires instaurées en France à partir de 1873 (données issues du TRF-GIS ; Gay, 2021). A : Régions militaires en 1874 ; B : Régions militaires en 1914 (les régions nouvelles ou modifiées apparaissent en orange) ; C : Evolution de l'organisation territoriale entre 1874 (18 régions) et 1914 (21 régions ; Musée du Génie, sd.a).

Enfin, ces réformes s'accompagnent d'un rapport renouvelé de l'armée aux espaces ruraux, forestiers et plus largement à l'ensemble du paysage, sous l'influence de paradigmes stratégiques en mutation (Amat, 2024). L'influence militaire se traduit par un contrôle législatif accru des transformations civiles (défrichements, travaux publics, infrastructures) et sur les interactions entre la population et les aménagements militaires (zones de servitude ; *cf.* partie 2.4.2). Cette emprise s'incarne notamment dans les décrets du 3 mars 1874 et du 8 septembre 1878 qui reconfigurent la Zone Frontière préalablement définie par la loi du 7 avril 1851 et plusieurs décrets impériaux (fig. 2.9A-C ; Reitel, 1994b). La commission mixte des travaux publics (CMTP) reçoit alors des prérogatives étendues sur les travaux civils et militaires, ainsi que sur les défrichements, dans un périmètre étendu au voisinage des frontières (Amat, 1993).

Cette évolution consacre le renforcement du contrôle militaire sur l'espace national et son articulation avec la stratégie défensive. La Zone Frontière devient une véritable interface entre aménagement du territoire et doctrine militaire, préparant l'émergence du système Séré de Rivières. Ces mesures, combinant réorganisation militaire et contrôle territorial, ne

peuvent être dissociées des innovations techniques et doctrinales contemporaines, qui orientent elles aussi la conception du futur système Séré de Rivières.

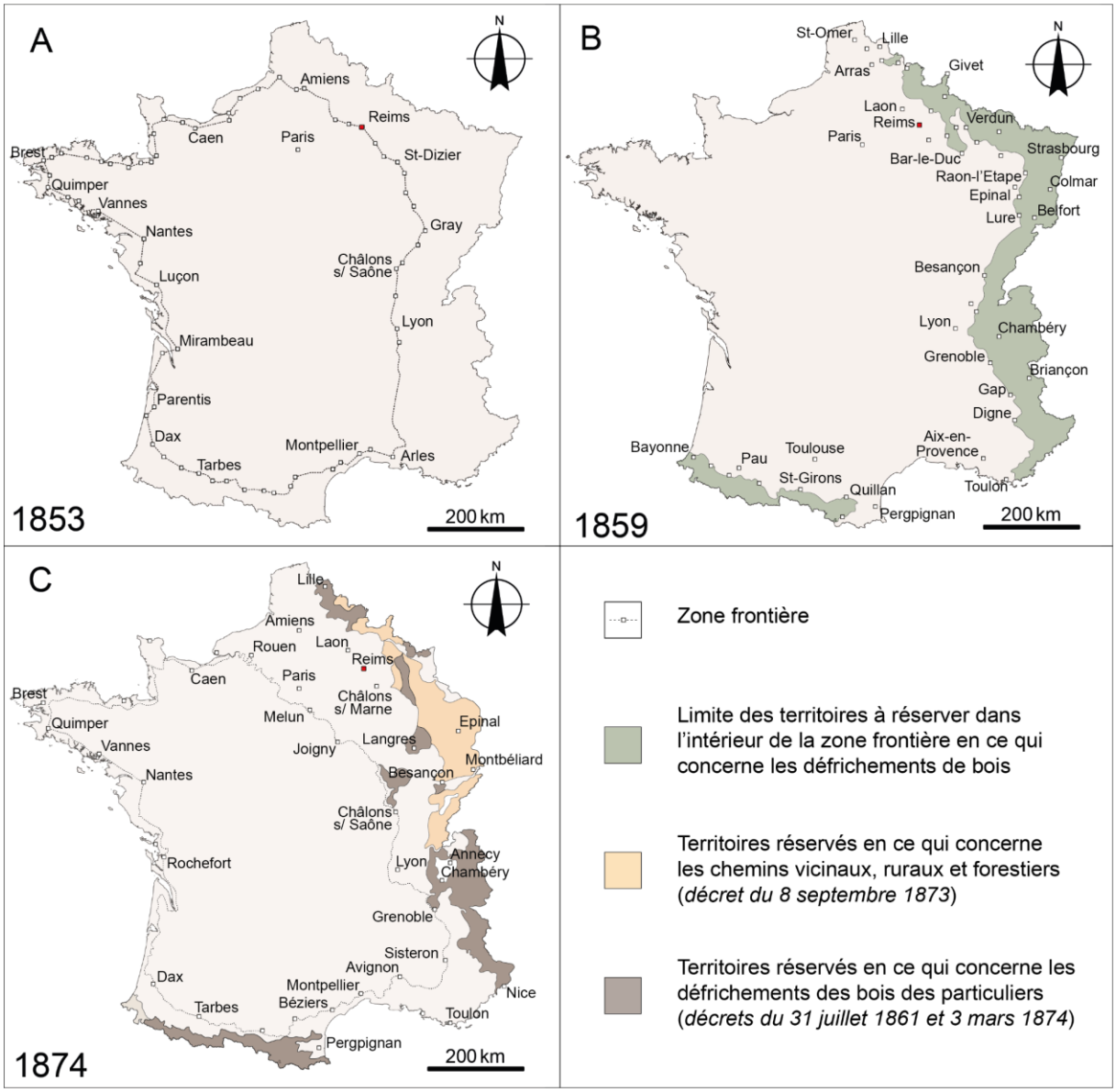


Figure 2.9 : Évolution de la Zone Frontière où s'appliquent notamment les prérogatives de la CMTP (d'après Reitel, 1994b). A : Zone frontière selon la loi du 7 avril 1851 et le décret impérial du 16 août 1853 ; B : Limite des territoires à réserver dans l'intérieur de la Zone Frontière en ce qui concerne les défrichements de bois (décret impérial du 22 novembre 1859) ; C : Délimitation de la Zone Frontière, réglementation des travaux mixtes et de défrichements (décret du 3 mars 1874).

2.2.3. Innovations techniques et rationalisation militaire : armement, chemin de fer et géographie militaire

Les innovations techniques, combinées aux réformes législatives et structurelles post-1871, transforment profondément l'architecture militaire française. Elles modifient à la fois l'implantation territoriale des ouvrages et leur morphogenèse, préparant l'émergence du système Séré de Rivières.

L'artillerie rayée, introduite dès 1858 (fig. 2.3), avait déjà fragilisé les enceintes bastionnées en rendant obsolètes leurs profils hauts et continus. Après 1871, l'accroissement des portées impose de placer les ceintures de forts à distance des villes et consacre la généralisation du fort polygonal détaché. Cette contrainte technique entraîne des transformations visibles dans la morphologie des ouvrages : profils abaissés, remparts épaissis, traverses multipliées, fossés élargis pour limiter les effets du tir courbe. Dans les décennies suivantes, chaque innovation technique impose de nouvelles adaptations (Ailleret, 1948) : obturateur de Bange (1877), obus à la mélinite (1885), poudre sans fumée (1884-1888), puis frein de recul du canon de 75 mm modèle 1897. Ces évolutions, en accroissant la cadence et la puissance de feu, obligent les ingénieurs à intégrer le béton armé et à compartimenter davantage les masses. La fortification devient ainsi une forme sans cesse remodelée par les contraintes offensives, matérialisant une nouvelle fois dans le paysage l'écart permanent entre vitesse du progrès technique et inertie constructive.

En parallèle, l'essor du chemin de fer bouleverse les conditions de la guerre. Dès les années 1830, la traction à vapeur permet des vitesses inédites et le transport de lourdes charges sur de longues distances (Dougherty, 2015). Après 1871, le rail devient un outil stratégique majeur, car il permet de mobiliser rapidement les conscrits, d'acheminer du matériel lourd et de verrouiller les nœuds logistiques (fig. 2.10A-B). Cette nouvelle mobilité transforme l'implantation des ouvrages, notamment avec des forts d'arrêt et des positions de barrage conçus en fonction des lignes ferroviaires à protéger ou à interdire. Le paysage défensif ne se réduit plus à une succession de reliefs fortifiés, mais s'étend à l'échelle des réseaux, chaque ouvrage s'inscrivant dans une trame articulée aux voies ferrées et aux axes de communication (Rocolle, 1973). Dans ce cadre, la destruction ou la capture des lignes ferroviaires devient un objectif prioritaire, tant leur maîtrise conditionne la mobilité des armées et l'efficacité des défenses (Montigny, 1937). Cette interaction entre polémoformes et infrastructures civiles introduit une dimension territoriale nouvelle, dont les traces demeurent perceptibles dans l'organisation actuelle des paysages.

Enfin, la fin du XIXe siècle voit l'affirmation d'une géographie militaire rationalisée. L'analyse du terrain ne relève plus seulement de l'intuition tactique, mais s'appuie sur des méthodes scientifiques intégrant géologie et géographie physique (Boulanger, 2019). Les travaux de Fervel (1870, 1873), Niox (1876, 1881), Marga (1885), ou Barré (1898, 1899) montrent cette volonté de déduire la conduite de la guerre des paramètres physiques et des reliefs. L'idée que « *le terrain commande l'action* » devient un principe doctrinal (Boulanger, 2019), car il est désormais considéré que « *choisir son espace, c'est aussi choisir sa guerre* » (Chiffre et Sauvage, 2016).

La création du Service géographique de l'Armée en 1887 institutionnalise cette approche via la généralisation des cartes et profils, ainsi que des analyses thématiques qui

accompagnent désormais la planification stratégique. Le système Séré de Rivières constitue une traduction directe de cette géographie militaire. Sa structuration en profondeur, son adaptation aux vallées, aux plateaux, aux reliefs et aux cours d'eau, et la logique de couverture mutuelle qu'il déploie, matérialisent cette intégration inédite entre science géographique et art de la fortification.

Ainsi, les forts de type 1874, dont ceux de la ceinture de Reims, doivent être compris comme le résultat de cette convergence entre progrès de l'armement, mutation des mobilités et rationalisation scientifique des paramètres géographiques des éventuels théâtres d'opération. Leur morphologie actuelle révélée au LiDAR témoigne à la fois de ces contraintes techniques et des choix défensifs opérés, constituant aujourd'hui un objet d'étude archéogéomorphologique privilégié.

À une échelle plus petite, le système Séré de Rivières, présenté dans la section suivante, résulte également en grande partie de la conjonction de ces trois grandes composantes majeures des évolutions du XIXe siècle.

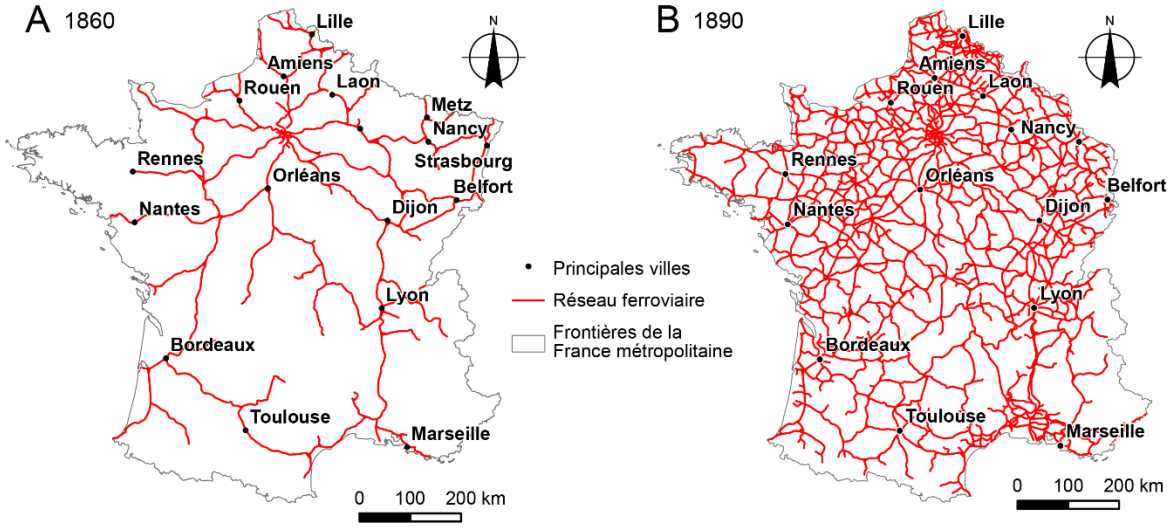


Figure 2.10 : Évolution du réseau ferroviaire entre 1860 et 1890. A : Réseau ferroviaire en 1860 (13 600 km) ; B : Réseau ferroviaire en 1890 (52 000 km).

2.3. L'émergence d'un paysage fortifié : le système Séré de Rivières

Comme nous l'avons vu jusqu'à présent, l'existence du système Séré de Rivières est le fruit d'un contexte donné, qu'il soit géopolitique (Guerre franco-prussienne), doctrinal (promotion de la fortification permanente) ou technique (*e.g.*, artillerie rayée) s'inscrivant dans la continuité d'héritages politiques et militaires séculaires (*e.g.*, fortifications bastionnées, Europe du Congrès de Vienne).

Cette sous-partie vise à présenter ses grands principes et son fonctionnement, selon une approche multiscalaire permettant d'apprécier les différentes échelles spatiales mises en œuvre dans la défense de la France. Dans un premier temps, elle retrace les principales étapes de son élaboration, rappelant bien l'existence du facteur humain, en insistant sur le rôle déterminant du Comité de défense, organe militaire central dans la genèse du dispositif. Dans un second temps, elle expose les logiques d'organisation spatiale à travers une lecture par secteurs géographiques, en mettant l'accent sur le quart nord-est de la France. Elle s'achève enfin par la présentation du fonctionnement théorique d'une place forte et des fonctions attribuées aux différents types de forts.

2.3.1. Chronologie du Comité de défense

Créé par décision présidentielle le 28 juillet 1872, le Comité de défense (CD) constitue l'organe central chargé de redéfinir la fortification permanente française après la défaite de 1870 (tab. 2.1). Sa mission est double : combler la brèche ouverte par le traité de Francfort et moderniser l'ensemble du dispositif défensif par la réorganisation des places fortes (Truttmann, 2017). Pour cela, une Sous-commission (SC) est instituée dès 1873 afin de traiter les questions techniques et de préparer les séances du comité principal, en lien direct avec les inspecteurs-généraux du Génie et de l'Artillerie envoyés sur le terrain pour étudier concrètement la faisabilité des projets de fortification.

À la croisée des deux instances, le général Séré de Rivières occupe une position unique, étant chef du Génie, secrétaire du CD et membre de la SC. Ce cumul de fonction lui permet d'être à la fois le concepteur théorique, le gestionnaire et le responsable des crédits débloqués par le Comité (Truttmann, 2017). Ses réalisations mettent fin à un siècle de tâtonnements techniques en établissant une doctrine standardisée selon les progrès de l'artillerie moderne (fig. 2.3). Ainsi, comme le rappelle Rocolle (1973), « *de même que la fortification de Vauban avait été l'harmonieux aboutissement des solutions esquissées par Pagan, ainsi que par le chevalier de Ville et par d'autres théoriciens, la fortification de Séré de Rivières fut la conclusion heureuse des réalisations de Rohaut de Fleury et de Dode de la Brunerie* » (directeurs de travaux de fortification de Lyon et Paris au milieu du XIXe siècle).

Entre 1872 et 1888, le CD et la SC se réunissent respectivement 38 et 35 fois. L'étude des procès-verbaux permet de distinguer cinq grandes séquences (fig. 2.11 ; Riccioli, 1999) :

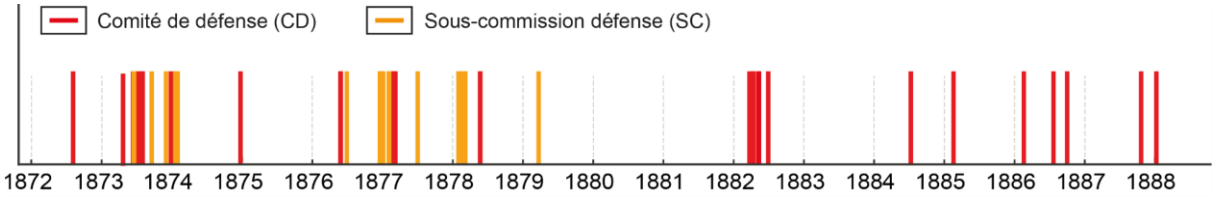


Figure 2.11 : Chronologie des réunions du Comité de défense et de la Sous-commission de défense tenues entre 1872 et 1888, recensées d'après les copies des procès-verbaux.

(i) La période initiale 1872-1874 correspond à la montée en puissance de l'organisme, avec 25 séances dont 9 de la CD constituant la première phase de réflexion et organisant le lancement des premiers travaux de construction, portant notamment sur la création du camp retranché de Paris (annexe 2).

Séré de Rivières publie deux mémoires fondateurs qui jettent les bases du dispositif : « *Considérations sur la reconstitution de la frontière de l'Est* » (présenté le 15 novembre 1873) et « *Exposé sur le système défensif de la France* » (présenté le 20 mai 1874). Ces réflexions débouchent sur la promulgation de la loi relative à l'amélioration des frontières de l'Est (17 juillet 1874), ainsi qu'à la publication de l'instruction du 9 mai 1874. La loi fournit le cadre juridique indispensable, tandis que l'instruction codifie les principes techniques émergeant après 1871 (*cf.* partie 2.4) : adoption des forts détachés, réduction des enceintes continues, critères d'implantation et distances entre les ouvrages, *etc.* (Truttmann, 2017).

(ii) L'année 1875 constitue une accalmie au sein du CD, malgré la crainte d'une invasion allemande (« alerte de 1875 ») qui facilite le déblocage des crédits et induit une accélération des travaux (Richard, 2009).

Dans son rapport sur la réalisation des travaux de fortification (10 novembre 1875), Séré de Rivières démontre la « *convenance d'organiser entre la frontière et Paris une nouvelle ligne de défense qui permet de disputer à l'ennemi les abords de la capitale* ». En plus d'un intérêt énoncé en ce sens pour le massif du Morvan, qui ne se concrétisera finalement pas (Chiffre et Sauvage, 2016), ce rapport envisage notamment la fortification des « *collines de la Champagne [...] entre La Fère et Nogent[-sur-Seine]* », en évoquant déjà Nogent-sur-Seine et Reims comme de potentiels « *centres spéciaux de résistance* ». La Champagne devient ici un objet d'analyse explicitement géographique, servant de point de départ aux réflexions approfondies menées par le Comité de défense à partir de 1876 sur l'établissement d'une seconde ligne de défense.

(iii) La période 1876 à 1878 marque l'apogée du CD avec 32 séances (dont 11 du CD) et le soutien du nouveau Président de la République Mac-Mahon (Richard, 2009). Les travaux se concentrent sur la moitié orientale du pays, de Dunkerque à Nice, là où les contraintes géopolitiques sont les plus vives. L'organisation du Génie est profondément réformée : 13 000 hommes dont 800 officiers supérieurs, 9 directions supérieures, 26 directions régionales et 107 chefferies assurent une gestion territorialisée des projets et un contrôle de terrain strict.

(iv) La période 1879-1881 (une réunion de la SC) est une étape clé dans l'évolution du dispositif défensif compte tenu de la défiance grandissante à l'encontre du service du Génie. Le discours du comte de Roys à l'Assemblée pour le compte du lobby des entrepreneurs ouvre une critique publique du dispositif, et Séré de Rivières est écarté en 1880 par le ministre de la Guerre, le général Farre (Truttmann, 2017).

(v) Enfin, lors de la période 1882-1888, alors que le système approche de son achèvement, l'impact de la « crise de l'obus-torpille » relègue le CD au second plan. La réunion du 2 octobre 1886, présidée par le général Boulanger (ministre de la Guerre), marque un tournant. Les expériences menées sur le fort de la Malmaison montrent la vulnérabilité des ouvrages aux projectiles modernes (*cf.* partie 2.5), expériences qui seront par la suite contestées par de nouvelles expérimentations menées au fort de St Antoine (Jura) en 1908. Il faut désormais abandonner les travaux restants et trouver une manière de renforcer l'existant (Truttmann, 2017). Les derniers travaux portent surtout sur la modernisation des grandes places de l'Est (Verdun, Toul, Épinal, Belfort) et sur quelques forts d'arrêt (Hirson, Montmédy, Pont-Saint-Vincent), à travers l'entérinement d'un nouveau programme de fortification en 1887 (*c.* 150 millions de francs-or).

Ainsi, en l'espace de quinze ans, le Comité de défense et la Sous-commission élaborent un système multiscalaire cohérent qui structure durablement l'espace militaire français, en définissant à la fois l'organisation générale des frontières et des places fortes, ainsi que les principes directeurs de construction des ouvrages. Derrière les débats politiques et techniques se dessine une véritable géographie de la défense, où les choix de localisation (Paris, Morvan, Champagne, littoral, frontières alpines et vosgiennes, *etc.*) révèlent la volonté d'articuler doctrine militaire et ancrage territorial. Ces fondements permettent désormais d'aborder la doctrine de la fortification permanente telle qu'elle s'affirme après 1871.

2.3.2. Doctrine de la fortification permanente après 1871

Pour comprendre ce système et en mesurer les implications, il importe désormais de préciser ce que recouvre l'expression de « système Séré de Rivières », dont la définition varie

selon les périodes et les auteurs. Le système Séré de Rivières ne renvoie en effet pas à une réalité unique et figée, mais recouvre plusieurs acceptions chronologiques qu'il importe de distinguer pour circonscrire le périmètre de cette recherche.

La première correspond aux ouvrages conçus et réalisés sous la direction effective du général Séré de Rivières, entre 1874 et sa mise en retraite en 1880. La deuxième, plus englobante, inclut les fortifications édifiées jusqu'au milieu des années 1880, c'est-à-dire avant que la crise de l'obus-torpille (1885-1886) ne remette en cause les principes de construction et doctrinaux initiaux (*cf.* partie 2.5). Enfin, une troisième acception est souvent employée pour qualifier l'ensemble des ouvrages bâtis entre 1874, date de publication des instructions générales de fortification, et 1914, à la veille du déclenchement de la Première Guerre mondiale (fig. 2.12). Cependant, à partir de 1886, ces forts ne peuvent plus être strictement qualifiés de « Séré de Rivières ». Le général n'exerce alors plus aucune autorité sur leur conception, et les ouvrages relèvent désormais de solutions transitoires. Ils se caractérisent par l'adoption de nouveaux profils, notamment le profil triangulaire, par l'abandon progressif du flanquement des fossés, ainsi que par une réduction des dimensions et une fragmentation accrue des dispositifs défensifs (Guillot, 1949 ; Truttmann, 2017).

La présente étude, centrée sur la décennie 1875-1885, se réfère à la deuxième acception. Bien que Séré de Rivières ait été écarté en 1880, les bases théoriques et techniques posées dans le contexte de l'après-guerre franco-prussienne demeurent structurantes jusqu'à la rupture doctrinale imposée par l'évolution de l'artillerie lourde. Les forts étudiés relèvent ainsi du type dit « 1874 » (1875-1885), caractérisant une génération cohérente d'ouvrages antérieurs aux grandes inflexions doctrinales de la fin du XIXe siècle.

Le nombre d'ouvrages construits durant cette période varie selon les sources, en raison notamment de divergences méthodologiques rarement explicitées (Rocolle, 1973 ; Le Hallé, 2001 ; Diest, 2022). L'inventaire de Rocolle demeure le plus exhaustif, recensant 166 forts, 43 ouvrages secondaires (redoutes, batteries, *etc.*) et près de 250 batteries intermédiaires jusqu'en 1885. Il importe toutefois de distinguer les « ouvrages secondaires » qualifiés de batteries, dont certains sont plus imposants que certains forts, des batteries d'artillerie classiques, souvent annexées aux fortifications principales. Plus récemment, Diest (2022) identifie 372 ouvrages construits ou remaniés, parmi lesquels 234 édifiés *ex nihilo*. C'est sur cette dernière catégorie, celle des créations nouvelles, que se concentre la présente recherche. À l'inverse, les fortifications antérieures simplement modernisées, tel que le fort de Joux (Jura) hérité d'un château médiéval (annexe 3), n'entrent pas en ligne de compte.

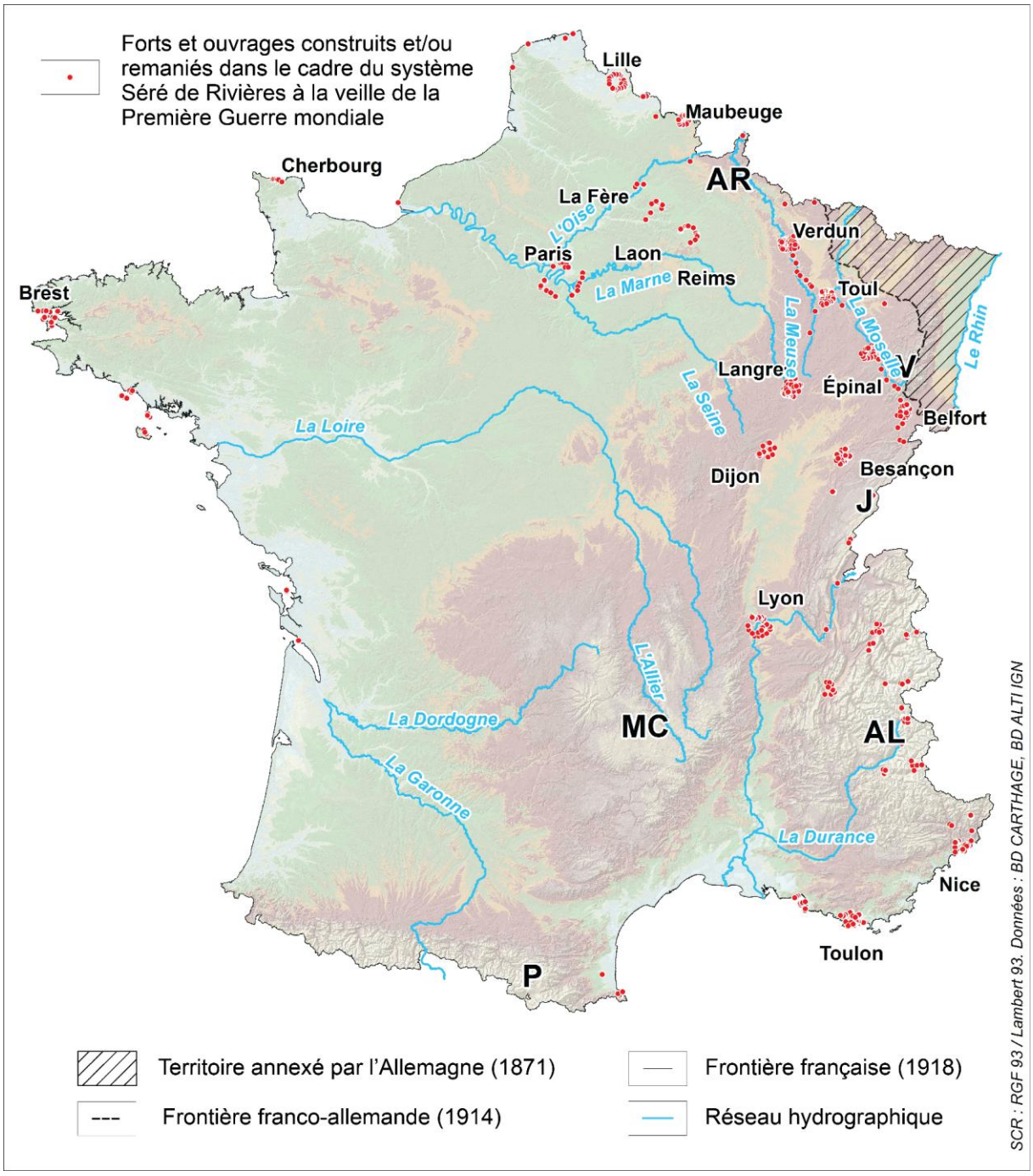


Figure 2.12 : Inventaire des forts et ouvrages fortifiés construits et/ou remaniés dans le cadre du système Séré de Rivières à la veille de la Première Guerre mondiale en France métropolitaine. AL. Alpes ; AR. Ardennes ; J. Jura ; MC. Massif Central ; P. Pyrénées ; V. Vosges.

Les objectifs stratégiques assignés au système sont clairement exprimés par Séré de Rivières lui-même : « *[...] couvrir la mobilisation, la concentration, les formations de combat des armées, régler les débouchés de l'invasion, organiser tant à la frontière que dans l'intérieur du territoire de solides points d'appui, qui, sans entraver la liberté des opérations, exaltent les propriétés stratégiques du territoire* » (discours rédigé en 1879 par Séré de Rivières, cité par Targe, 1930). Ce dispositif doit permettre de tenir environ trois semaines, délai jugé nécessaire à la mobilisation et à l'organisation de la riposte. Autrement dit, il s'agit d'articuler la manœuvre

des armées, désormais fortement dépendante du réseau ferroviaire (fig. 2.10A-B ; parties 2.2.2 et 2.2.3), avec un maillage de fortifications permanentes assurant le verrouillage stratégique du territoire (Barros, 1999). Cette logique s'inscrit dans la continuité des préconisations du général Poitevin de Maureilhan formulées dès 1818, plaidant déjà pour un système discontinu, organisé en régions fortifiées et « *offrant seulement des points d'amarrage à la manœuvre des armées* » (Rocolle, 1973).

À l'échelle nationale, le système se décline en ensembles régionaux articulés aux grandes lignes frontalières (Le Hallé, 2001) : groupe Nord (Lille, Maubeuge), groupe Meuse-Moyenne (Verdun, Toul, Reims), groupe Vosges (Épinal, Belfort, Langres), groupe Jura (Besançon, Pontarlier, Dijon), groupes alpins (Albertville, Modane, Briançon, *etc.*), auxquels s'ajoutent Toulon, Nice et quelques points sur la façade atlantique et les Pyrénées. La densité de ces fortifications varie selon la perception du risque d'invasion, plus marquée dans le quart nord-est.

Ces entités régionales correspondent à des configurations topographiques et stratégiques spécifiques qui répondent à quatre grandes fonctions défensives (fig. 2.13 ; Targe, 1930) :

(i) Les *rideaux défensifs frontaliers*, sont de véritables chaînes de forts encadrés par des places fortes, capables de croiser leurs feux et de canaliser l'offensive ennemie dans des trouées topographiques prédéterminées, « *assez forts et assez approvisionnés pour exiger un siège ; assez petits cependant pour être défendus avec assez peu de monde* » (discours rédigé en 1879 par Séré de Rivières, cité par Rocolle, 1973). Deux rideaux majeurs sont identifiables : l'un s'appuyant sur la côte de Meuse, entre Verdun et Toul (forts de Génicourt, Troyon, des Paroches, du Camp des Romains, de Liouville, de Gironville, de Jouy) ; l'autre essentiellement en rive gauche de la Haute-Moselle, entre Épinal et Belfort (forts d'Arches, de Remiremont, de Rupt, de Château-Lambert, de Servance et de Giromagny). À la frontière nord, un dispositif plus restreint, assimilable à une ligne de résistance, verrouille les vallées de l'Oise et de la Sambre autour des forts de Maulde, Flines et Le Quesnoy, encadrés par les places de Lille et Maubeuge.

(ii) Les *forts d'arrêt sur les axes de communication*, en particulier sur les voies ferrées, sont destinés à interdire l'accès rapide à l'intérieur du territoire, car « *tant que l'ennemi ne sera pas en possession des voies ferrées reliant ses lignes d'opération à son propre territoire, sa situation sera extrêmement précaire* » (Séré de Rivières, 1873).

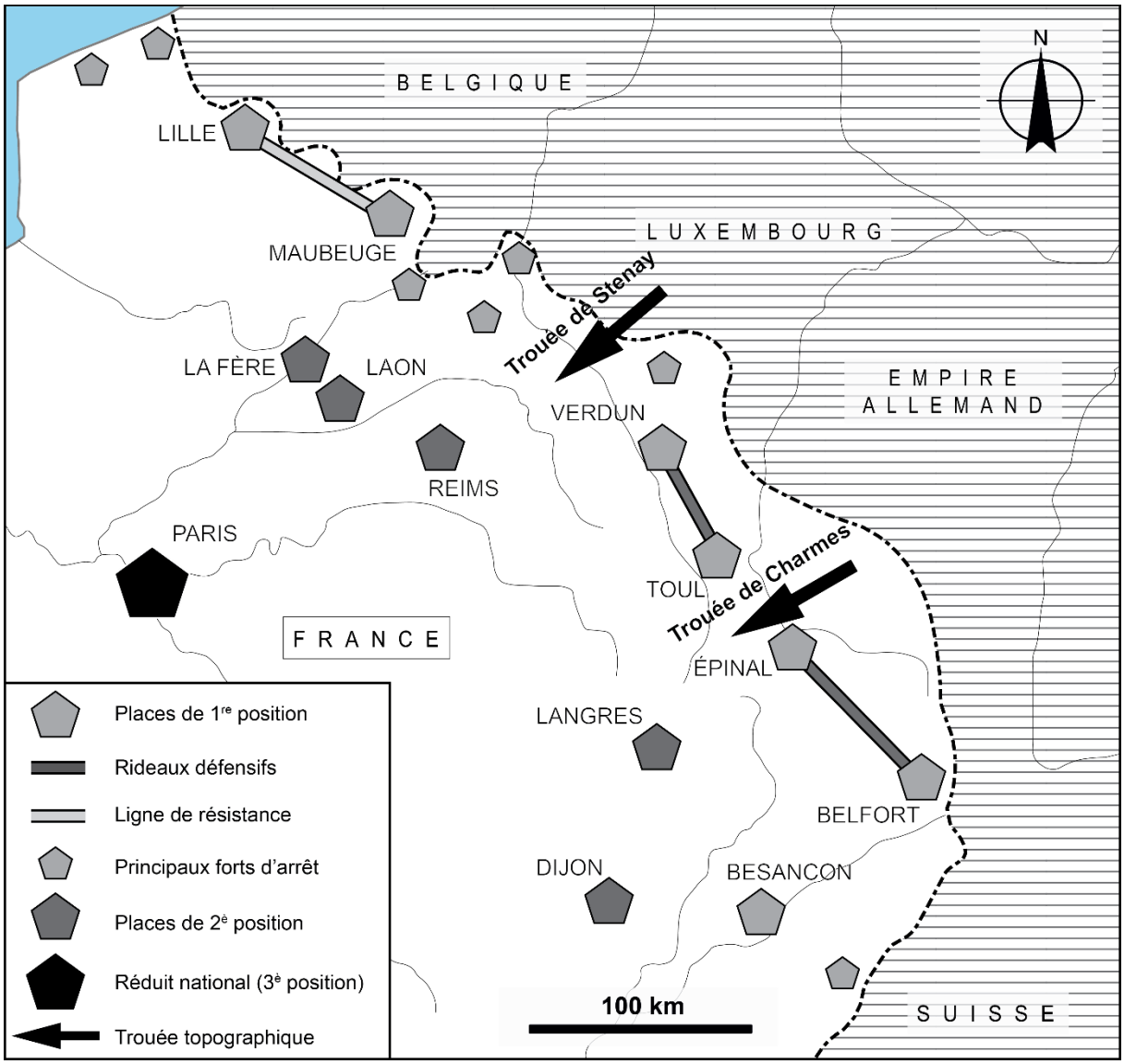


Figure 2.13 : Croquis du système Séré de Rivières devant les frontières nord-est et nord, constituant le cœur du dispositif défensif.

(iii) Les *lignes de résistance en profondeur*, positionnées en retrait, visent à contenir l'ennemi et à offrir des appuis aux manœuvres françaises par l'intermédiaire de places de seconde ligne. Elles traduisent ainsi un basculement stratégique par rapport aux dispositifs antérieurs centrés sur la frontière, lacunaires lors des campagnes de 1814 et 1870, en articulant la défense dans la profondeur du territoire national (Barros, 1999). Cela justifie la fortification du plateau de Langres (places de Langres, Dijon) et de la « *Falaise de Champagne* » (Reims, Laon, La Fère), considérée comme le « *dernier obstacle* » avant Paris (Niox, 1881).

(iv) Les *camps retranchés*, enfin, constituent les ultimes réduits stratégiques protégeant les ressources vitales du territoire. Paris en constitue l'archétype, avec une double ceinture fortifiée (années 1840, fig. 2.2 ; puis 1870-1880), renforcée par des ouvrages intermédiaires

et des dispositifs de défense de campagne (annexe 2). Lyon joue un rôle similaire sur le flanc sud-est, face à la frontière italienne.

Dans le cadre des places fortes et des camps retranchés, l'amélioration des portées d'artillerie (environ 6 km en 1874) favorise l'adoption des forts détachés, implantés en avant des villes sur les points hauts offrant une position favorable. Cette innovation rend possible la mise en sûreté des agglomérations et confère aux places une autonomie accrue, à la fois logistique et défensive. Son organisation repose sur trois niveaux (fig. 2.14) : un noyau central souvent hérité d'une place ancienne, une ceinture de forts détachés (diamètre idéal 13 km, développement 40 km ; Truttmann, 2017), et une défense extérieure assurée par des retranchements de campagne réalisés au dernier moment. Les obstacles naturels sont systématiquement intégrés, et les lacunes de tir comblées par des ouvrages intermédiaires (redoutes, batteries, *etc.*). Enfin, l'intégration au réseau ferroviaire national (fig. 2.10A-B), et parfois à des voies ferrées internes à écartement réduit, assure la mobilité des troupes et le ravitaillement des forts avancés.

Ainsi se dessine un dispositif à la fois discontinu et cohérent, où la standardisation des principes de fortification s'adapte aux contraintes du relief et aux réseaux de communication. Cette logique d'ensemble trouve sa traduction concrète dans l'architecture et l'organisation interne des forts de type 1874, qui sont examinées dans la section suivante.

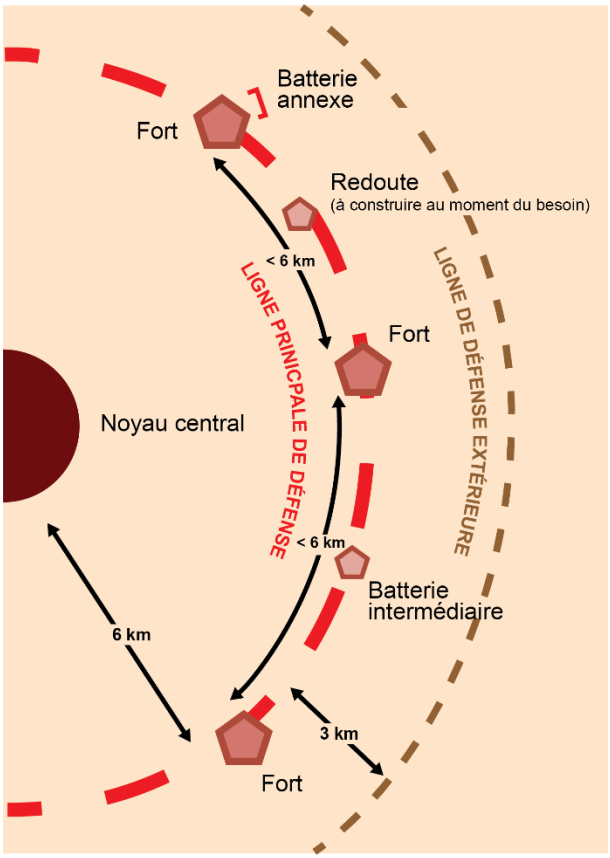


Figure 2.14 : Schéma théorique du fonctionnement d'une place forte (Musée du Génie, sd.b).

2.4. Aspects architecturaux, organisationnels et théoriques des forts de type 1874

L'analyse morphologique des reliefs fortifiés révélés par les données LiDAR suppose de revenir sur l'architecture et l'organisation des ouvrages Séré de Rivières. Leur logique d'implantation et leur structure interne conditionnent en effet les formes encore visibles dans le paysage. Cette section vise donc à présenter les caractéristiques des forts de type 1874, depuis leur conception jusqu'à leur rôle théorique dans le dispositif défensif.

2.4.1. Définition et typologies

Dans ce système renouvelé de fortification permanente, le fort polygonal constitue le module de base de l'organisation défensive (Truttmann, 2017).

Indépendamment de leur appellation ou de leur taille, les ouvrages de première génération, construits entre 1874 et 1885, se caractérisent par une organisation structurée en profondeur, combinant des éléments maçonnés, ou non, recouverts d'un épais remblai de terre.

Il est possible de distinguer trois grandes catégories fonctionnelles selon leur rôle dans le dispositif défensif (fig. 2.15A-D) :

(i) Les *forts de ceinture*, les plus nombreux, sont implantés autour d'une agglomération pour constituer une place forte, voire un camp retranché, ou une place d'appui lorsque peu développée tel que c'est le cas à Reims (fig. 0.2, 2.15A). Leur artillerie est orientée vers l'extérieur (front de tête), tandis que le front de gorge, tourné vers la ville, reste volontairement plus vulnérable, selon le principe d'irréversibilité de la fortification (Truttmann, 2017).

(ii) Les *forts d'arrêt*, plus rares, sont positionnés isolément sur des points de passage stratégiques et dotés d'une crête d'artillerie périphérique assurant une couverture tous azimuts (fig. 2.15B).

(iii) Enfin, les *forts de rideau* constituent des chapelets continus entre deux places fortes afin de canaliser l'ennemi, sans morphologie spécifique, pouvant reprendre la configuration d'un fort de ceinture ou d'arrêt (fig. 2.15C-D).

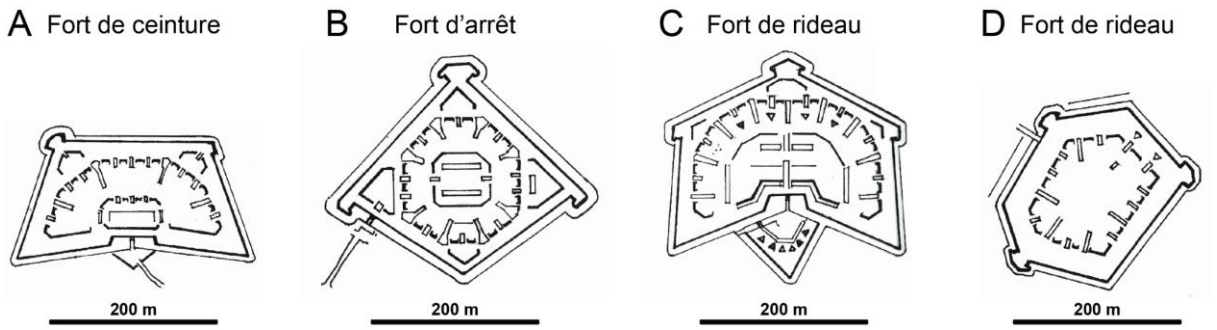


Figure 2.15 : Exemples de forts type 1874 (d'après Truttmann, 2017). A : Fort de Seclin (à massif central ; place de Lille) ; B : Fort de Bourlémont (à massif central, secteur de Neufchâteau, Vosges) ; C : Fort de Génicourt (à massif central ; rideau des Hauts-de-Meuse, Meuse) ; D : Fort de Château-Lambert (à crête unique ; rideau de la Haute-Moselle, Haute-Saône).

Des ouvrages spécifiques sont également édifiés dans des contextes particuliers, notamment en montagne ou sur les littoraux (batteries de côte). En zone montagneuse, on distingue généralement trois types (Coquet, 1999) : les *forts de surveillance* sur les crêtes, les *forts de protection* implantés à mi-versant, et les *forts d'interdiction* situés sur des replats, barrant les fonds de vallée.

Au-delà de cette typologie fonctionnelle, une seconde classification repose sur la disposition des crêtes d'artillerie et la configuration interne des forts (fig. 2.16A-C) :

(i) Les *forts à cavalier* comportent une batterie haute aménagée au sommet du massif de terre recouvrant le casernement (position dominante analogue à celle d'un cavalier) et une crête d'infanterie disposée au sommet du rempart (fig. 2.16A). Cette solution, typique des années 1860 (*e.g.*, fort de Queuleu à Metz ; fig. 2.5B), puis des constructions menées entre 1874 et 1877, notamment autour de Paris, favorise l'observation mais expose davantage l'ouvrage.

(ii) À partir du milieu des années 1870, les *forts à massif central* s'imposent progressivement. L'artillerie est placée en batterie basse, au-delà de la rue du rempart, au-dessus de l'escarpe, et l'infanterie sur le massif de terre (fig. 2.16B). Cette disposition est plus discrète et permet de mettre en service l'artillerie avant l'achèvement complet du fort, un avantage crucial en période de tension (comme lors de l'alerte de 1875).

(iii) Plus rares, les *forts à crête unique* regroupent sur une même ligne les positions de tir de l'artillerie et de l'infanterie (fig. 2.16C).

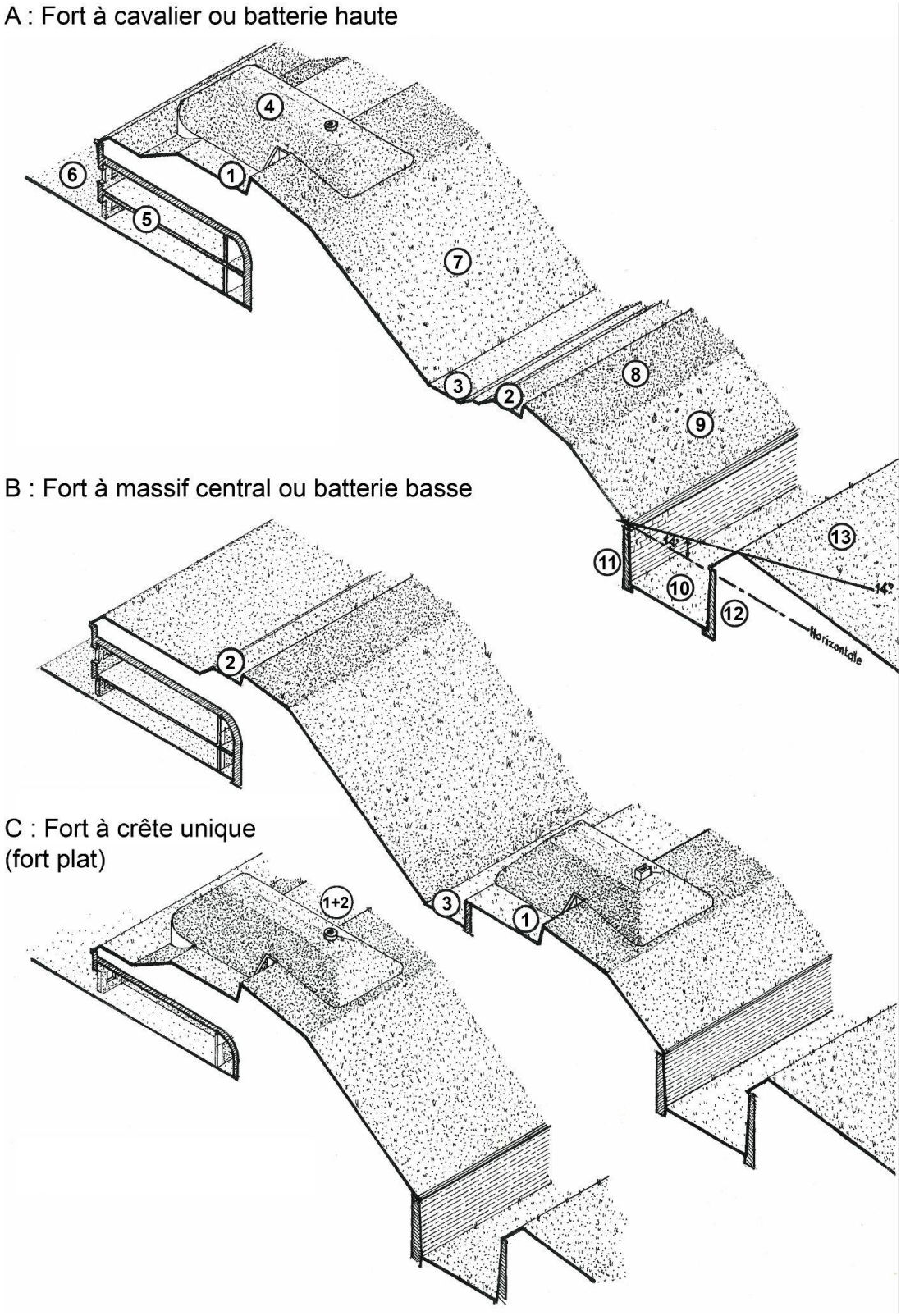


Figure 2.16 : Classification par disposition des crêtes d'infanterie et d'artillerie (d'après Truttmann, 2017). A : Fort à cavalier ou à batterie haute ; B : Fort à massif central ou à batterie basse ; C : Fort à crête unique. 1. Terre-plein et crête d'artillerie ; 2. Crête d'infanterie ; 3. Rue du rempart ; 4. Traverse-abri ; 5. Casernement ; 6. Cour du casernement ; 7. Parados ; 8. Plongée ; 9. Talus extérieur ; 10. Fossé ; 11. Mur d'escarpe ; 12. Mur de contrescarpe ; 13. Glacis

Ces typologies générales constituent un cadre de lecture indispensable, qu'il convient désormais de préciser en examinant les principaux organes architecturaux dont la configuration conditionne directement la morphologie des formes fortifiées.

2.4.2. Organisation interne

Comme le souligne Simoutre (1889a), « *la fortification, quelle que soit sa nature, implique toujours un certain nombre de parties distinctes formant autant d'unités tactiques de défense* ». Les figures 2.16B, 2.17 et 2.18A-B illustrent, dans ce cadre, l'organisation théorique d'un fort Séré de Rivières de type 1874 à massif central, tel qu'on en trouve dans la ceinture fortifiée de Reims. Ces représentations servent ici de guide pour décrire les unités tactiques autour de trois grands ensembles dont la configuration conditionne directement la morphologie des reliefs encore visibles dans la topographie actuelle, notamment à travers les données LiDAR.

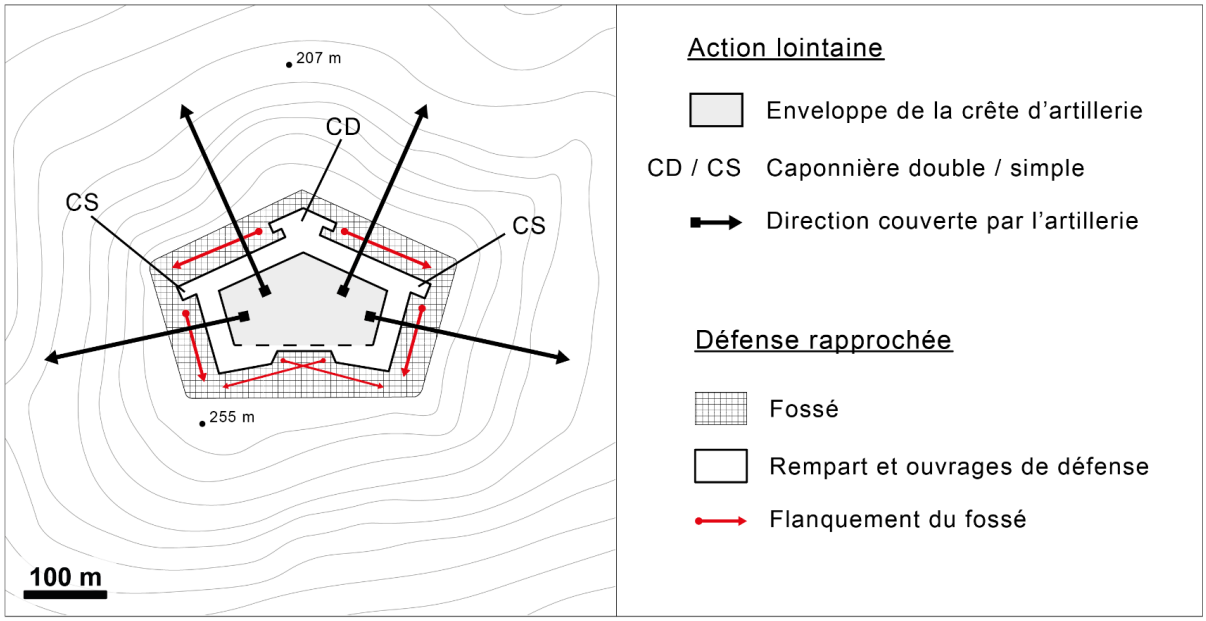


Figure 2.17 : Plan théorique de l'organisation générale d'un fort Séré de Rivières de première génération (type 1874 ; d'après Guillot, 1949).

(i) Le premier ensemble, dédié à l'*action lointaine*, raison d'être de ces fortifications, regroupe les dispositifs liés à l'artillerie de combat à tir direct (ou « de plein fouet ») et à la protection contre les tirs ennemis, organisés autour du rempart et du parapet. La crête d'artillerie est tracée de façon à pouvoir battre le plus de zones dangereuses possibles. En arrière, la rue du rempart dessert une alternance de terre-pleins, dimensionnés selon le calibre des pièces prévues, et de traverses, destinées à protéger les batteries des tirs d'enfilade (fig. 2.18A-B, 2.19A-B). Les traverses peuvent être « enracinées » lorsqu'elles rejoignent le parados afin d'augmenter la protection vis-à-vis des terre-pleins aux coups de revers (annexe 4), mettant à l'épreuve l'accès aux substructures situées dans le massif central lorsqu'elles sont

casematées (traverses-abris ; fig. 2.20A-B). La protection face aux coups de l'ennemi est complétée par un parapet frontal prolongeant chaque terre-plein, dont la crête matérialise la ligne de tir (crête d'artillerie, de feu ou intérieure). L'accès aux plates-formes d'artillerie aménagées sur les terre-pleins se fait, selon la configuration, par des rampes où les pièces sont hissées à bras d'hommes avec mouflage (*i.e.*, l'utilisation de poulies et de cordes ; fig. 2.19B), ou, lorsque ces rampes sont impossibles, au moyen d'une « chèvre de place », appareil de levage permettant de les mettre en batterie à hauteur du terre-plein (Garnier, 2014). En avant de la crête d'artillerie se développe le versant externe du parapet (fig. 2.16B, 2.18B ; Simoutre, 1889a). Il est composé dans sa partie supérieure par la plongée, également compartimentée par les traverses, dont la pente, théoriquement fixée autour de 10-15° (Simoutre, 1889a), tend à s'adapter aux déclivités situées au-delà du fossé, demeurant globalement équivalente à celle du glacis. Le talus extérieur constitue la partie inférieure, faisant la jonction avec le fossé. Son inclinaison, initialement fixée entre 38 et 40° par la commission de 1874, fut ramenée à 33-34° en raison de la faible stabilité de la solution retenue, malgré l'emploi de dispositifs de génie végétal tels que des arbustes à racines traçantes pour renforcer la cohésion du sol (*cf. infra* ; Simoutre, 1889a).

En parallèle de ces composantes structurelles relativement invariables liées à l'action lointaine, les premiers cuirassements conçus par le commandant Mougin sont plus ponctuellement mis en œuvre. Ils visent à protéger certaines positions de tir, soit contre l'artillerie de campagne (casemates en fer laminé), soit contre l'artillerie lourde (casemates en fonte dure), ou prennent la forme de tourelles cuirassées. En raison de leur coût élevé, ces dispositifs sont prioritairement implantés sur les forts de première ligne, où leur nombre augmente sensiblement après la crise de l'obus-torpille (Truttmann, 2017).

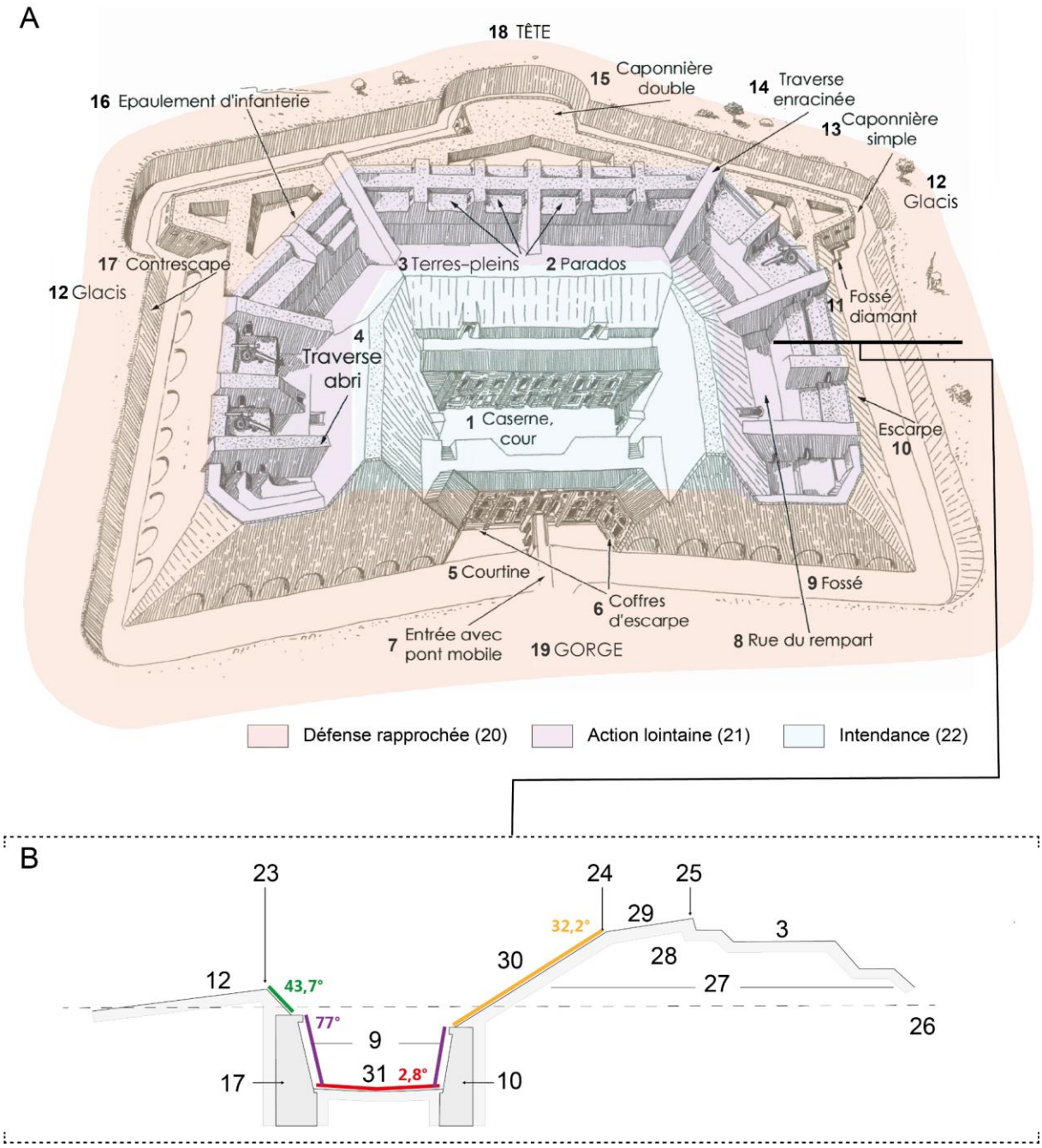


Figure 2.18 : Schémas théoriques d'un fort Séré de Rivières type 1874 à massif central. A : Vue cavalière (d'après Coutant et al., 2017) ; B : Profil théorique du rempart d'une fortification Séré de Rivières de type 1874. Les pentes théoriques du fossé sont indiquées en couleur (d'après Guillot, 1949 ; 3 : Terre-pleins ; 9 : Fossé ; 10 : Escarpe ; 12 : Glacis ; 17 : Contrescarpe ; 23 : Crête du chemin couvert ; 24 : Crête extérieure ; 25 : Crête de feu (crête intérieure) ; 26 : Sol naturel ; 27 : Rempart ; 28 : Parapet ; 29 : Plongée ; 30 : Talus extérieur ; 31 : Cunette.

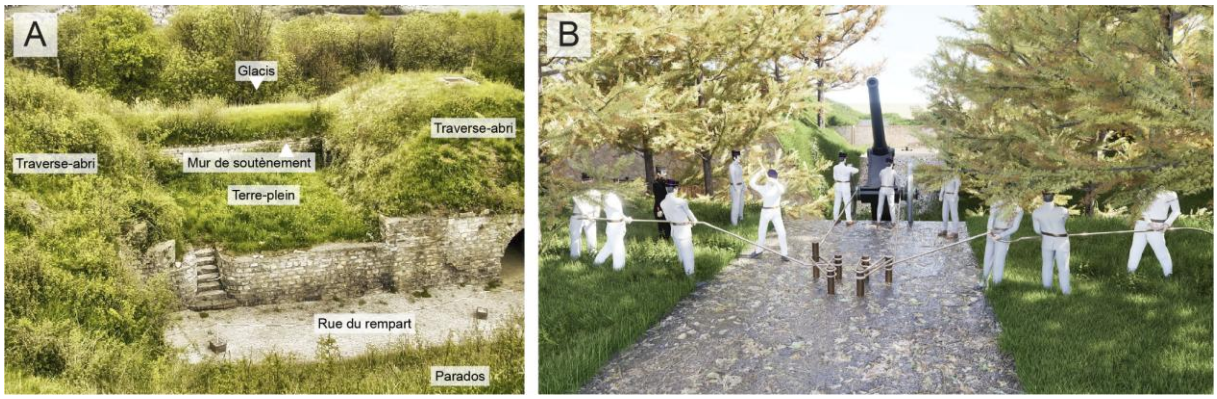


Figure 2.19 : Structures dédiées à l'action lointaine situées sur la partie interne du parapet (avant la crête d'artillerie). A : Terre-plein d'artillerie du fort du Mont-Bart (place de Belfort ; Garnier, 2014) ; B : Manoeuvre de force ; descente pour la mise en batterie d'un canon de 155L mle 1877 (Reconstitution 3D ; légende et source : Florian Garnier).

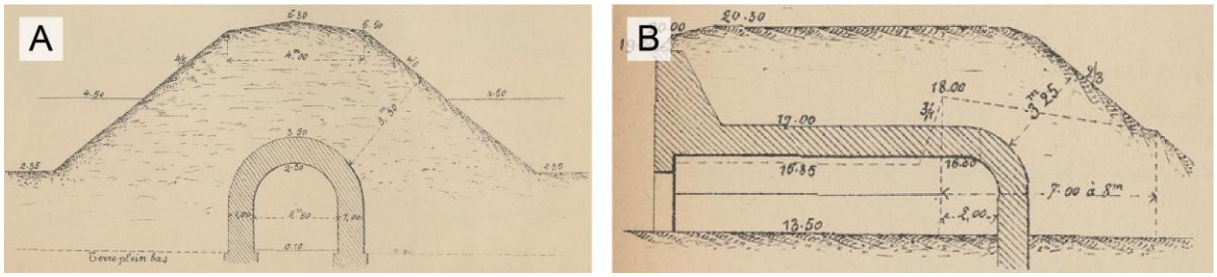


Figure 2.20 : Croquis d'une traverse-abri théorique (Simoutre, 1889b). A : Coupe transversale réalisée au milieu de la structure ; B : Coupe longitudinale (l'entrée est à gauche et le front à droite).

(ii) Le deuxième groupe comprend les éléments situés au-delà du rempart, dont la fonction est d'interdire l'accès immédiat à l'ouvrage (*défense rapprochée* ; fig. 2.18A-B). Il s'agit en premier lieu du fossé sec périphérique, profond d'environ 8 m et large d'environ 8-10 m, qui répond au principe fondamental de séparation entre assaillant et défenseur par un obstacle passif (Simoutre, 1889a). Son tracé a notamment vocation à donner une direction telle que les caponnières (*cf. infra*) ne soient pas soumises aux tirs d'enfilade. Le fossé se compose d'un fond (ou « plafond »), légèrement incliné vers l'intérieur pour l'écoulement de l'eau (*c.* 2,8°) encadré par deux talus maçonnés à la base d'une inclinaison moyenne de l'ordre de 77° : l'escarpe, côté fort, destinée à empêcher l'escalade, et la contrescarpe, côté extérieur, surmontée du chemin couvert, voué à compliquer l'accès à d'éventuelles brèches dans le rempart. Plusieurs types d'escarpe se rencontrent selon le type de revêtement (Simoutre, 1889a) :

- Attaché : mur plein ou à arceaux de décharge directement adossé au talus ; coûteux et soumis à forte poussée.

- Détaché : mur détaché en contrebas, indépendant du talus et donc soulagé de la contrainte latérale exercée par la terre, privilégié en terrain argileux pour prévenir les glissements.

- Demi-détaché : formule intermédiaire combinant un mur plus bas et moins épais, souvent surmonté d'un mur détaché percé de créneaux et d'un chemin de ronde.

- Non revêtu (à terres coulantes) : talus dépourvu de murs maçonnés généralement remplacé par des grilles défensives (de même que peut l'être la contrescarpe).

Le fossé est flanqué par des caponnières, des coffres flanquant (sans artillerie) ou plus tardivement, par des coffres de contrescarpe intégrés à la maçonnerie, protégés de l'encombrement par des fossés-diamants en cas d'éboulement (fig. 2.18A, 2.21). Elles sont simples ou doubles, voire exceptionnellement triple tel qu'au fort de Dampierre (place de Langres) ou au-devant de l'enceinte de Montmédy (Truttmann, 2017). Plus tardivement, elles seront remplacées par des coffres de contrescarpe intégrés à la maçonnerie, moins exposés aux coups d'artillerie. Ces caponnières sont des constructions voutées à l'épreuve (*i.e.*, résistant à l'artillerie), recouvertes de terres et adossées à l'escarpe, munies d'un armement d'artillerie destiné à battre le fossé dans sa longueur (flanquement ; fig. 2.17). Leur tête orientée vers l'extérieur et percée de créneaux de tir pour la protection rapprochée, et leurs flancs, percés d'embrasures dédiées à l'artillerie, permettent d'assurer le tir dans le fossé (canon de 4, de 5 et 7 puis de 12 culasses, canon à balles puis canon-revolver Hotchkiss, *etc.*).

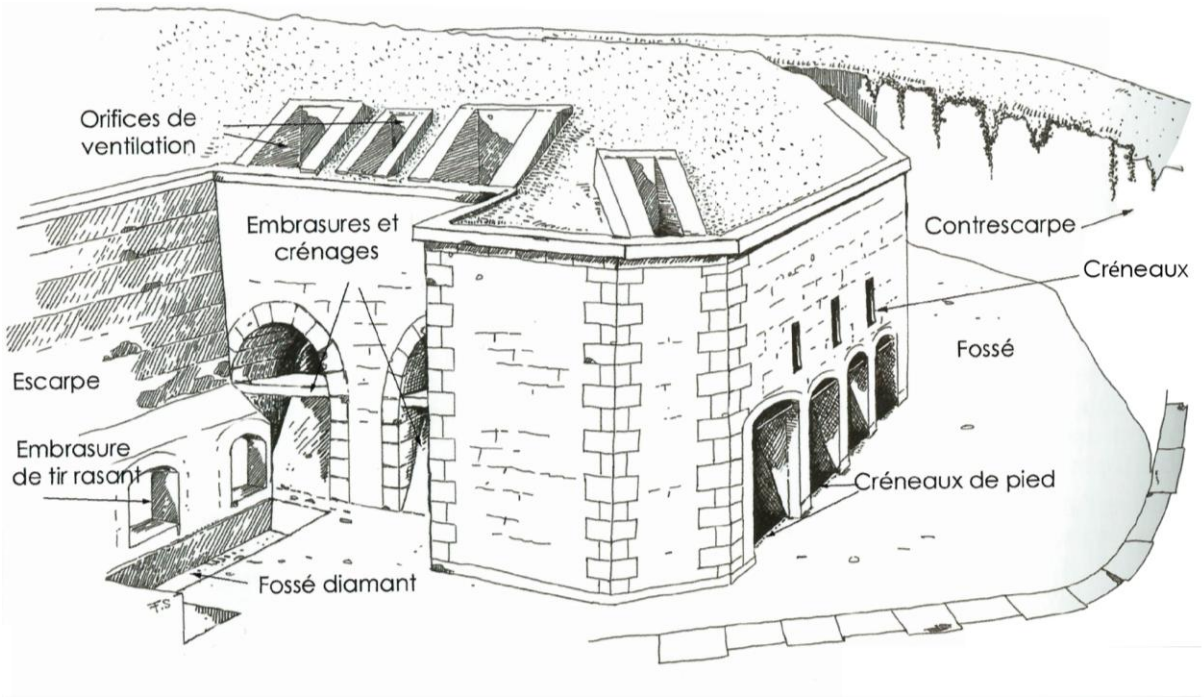


Figure 2.21 : Caponnière simple type d'un fort de type 1874 (Coutant et al., 2017).

Enfin, un glacis militaire en pente douce (3-10°) assure la visibilité depuis la crête de feu, couvre l'escarpe et empêche l'ennemi de s'y dissimuler afin d'exposer l'assaillant aux coups du défenseur (Simoutre, 1889a).

Ces deux ensembles, dédiés à l'action lointaine et à la défense rapprochée, comprenant le rempart et les structures situées au-delà, présentent un degré de standardisation élevé dans la zone comprise entre la crête extérieure et la crête du chemin couvert. Cette portion, constituée essentiellement de talus, montre des pentes très homogènes d'un ouvrage à l'autre, conformément aux prescriptions du Génie et aux cours de fortification de l'époque (Simoutre, 1889a).

(iii) Le troisième ensemble, situé au cœur du fort, regroupe les bâtiments nécessaires à *l'intendance* et à la vie de garnison (casernement, cuisines, boulangerie, magasins aux vivres et aux munitions, latrines, *etc.*). Ces substructures maçonnées, souvent invisibles en surface ou dans les modèles LiDAR, car recouvertes de plusieurs mètres de terre, ne sont pas détaillées dans le présent travail. Leur organisation et leurs caractéristiques sont en revanche largement décrites dans les cours de fortification de Simoutre (1889a) et dans l'ouvrage de référence de Truttmann (2017) consacré aux forts Séré de Rivières.

À ces trois groupes structurants s'ajoutent deux éléments souvent négligés mais essentiels dans la lecture morphologique actuelle : la végétation et les zones de servitude. Dès les années 1870, une instruction de 1877 encadre l'emploi stratégique de plantations dans les forts en construction, rompant avec la fonction logistique traditionnelle des boisements militaires (fig. 2.22 ; tab. 2.2 ; Simoutre, 1889a). Certaines essences sont sélectionnées pour leurs capacités de camouflage, de consolidation des talus, et de frein à l'offensive (*e.g.*, système racinaire traçant compliquant le creusement de tranchées). Des réflexions sont également menées sur la fertilité des sols et le choix des essences à utiliser pour le gazonnement (ray-grass, fétuque, sainfoin, luzerne, *etc.* ; Boileau, 1899). Le végétal devient ainsi un composant à part entière de l'organisation défensive, intégré aux choix d'implantation, modifiant durablement l'aspect des ouvrages, ainsi que leur couverture végétale, des transformations qui influencent encore aujourd'hui leur lecture topographique.

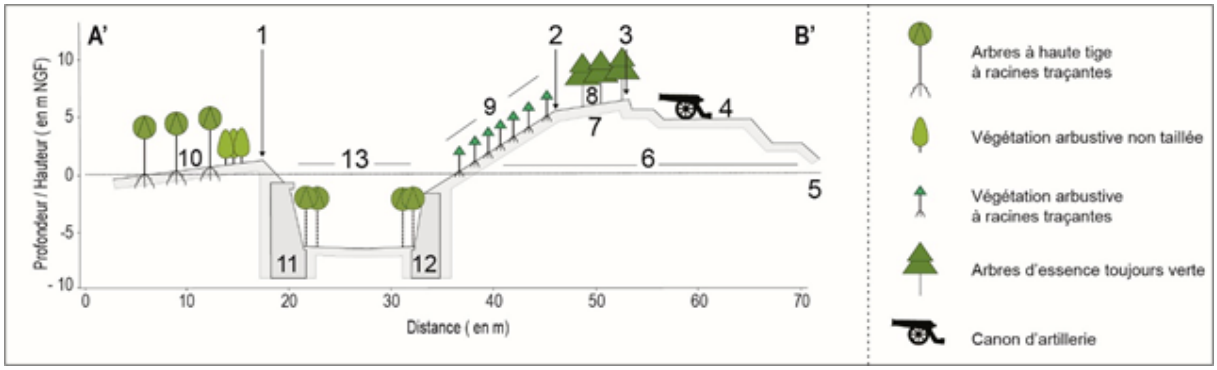


Figure 2.22 : Transect de l'emploi de la plantation théorisé dans l'instruction de 1877, d'après le cours de fortification du capitaine du Génie Simoutre (1889a). 1. Crête du chemin couvert ; 2. Crête extérieure ; 3. Crête de feu (crête intérieure) ; 4. Terre-plein ; 5. Sol naturel ; 6. Rempart ; 7. Parapet ; 8. Plongée ; 9. Talus extérieur ; 10. Glacis ; 11. Contrescarpe ; 12. Escarpe ; 13. Fossé.

Figuré	Site	Type de végétation	Caractéristiques	Action en temps de guerre	Fonction	Essence potentielle
	Glacis	Arborée	• À haute tige • Élaguée • Disposition en quinconce • À racines traçantes	Aucune	• Masquer la fortification aux vues de l'ennemi • Gêner les travaux de sape et le creusement de tranchées offensives	
	Crête extérieure	Arbustive	• Non taillée • Haie vive ou taillis	Aucune	• Gêner l'appréciation des dégâts en cas de tir en brèche ennemi	
	Fossé avec contre-escarpe en terre (non maçonnée)	Arborée	• À haute tige • Disposition resserrée	Découpe	• Création d'abatis	
	Fossé avec escarpe en terre (non maçonnée)	Arborée	• À haute tige	Individus potentiellement reliés par des fils de fer	• Base d'une escarpe improvisée • Palissadement	
	Talus extérieur	Arbustive	• À racines traçantes	Aucune	• Augmentation de la résistance aux projectiles du talus	Acacia, Orme
	Plongées au pied des traverses	Arborée	• Sempervirente	Découpe au niveau des traverses-abris	• Suppression des échancrures • Masquer la fortification aux vues de l'ennemi	Épicéa (Picea Abies)

Tableau 2.2 : Synthèse des préconisations de l'instruction de 1877 relative à la plantation de la fortification rapportée par Simoutre (1889a).

Autour des forts, les zones de servitude définies par les lois de 1791, 1819, 1851 et surtout par le décret du 10 août 1853 visent à garantir le champ de tir et à empêcher tout aménagement pouvant offrir un couvert à l'ennemi, à travers la mise en place de trois zones concentriques (Garnier, 2021) : 250 m (interdiction stricte à l'exception de clôtures légères), 487 m (édifices provisoires en matériaux périssables autorisés) et 974 m pour les places et (contrôle des excavations, levées et carrières ; 584 m pour les postes). Le terrain militaire proprement dit, de la rue du rempart jusqu'au glacis, est inaliénable et imprescriptible. Le bornage de ces périmètres est matérialisé par des bornes polygonales, dont des saignées pratiquées sur la face supérieure indiquent précisément la limite de l'enceinte concernée, qui subsistent encore parfois aujourd'hui.

En l'occurrence, ces contraintes marquent durablement les usages du sol des riverains. Elles interdisent les cultures pérennes, les constructions en dur ou les aménagements agricoles lourds et peuvent entraîner des démolitions *manu militari* sans compensation, générant des tensions et une mémoire sociale particulière (la « zone » ; Sardain, 2014). La fortification modèle ainsi non seulement le relief, mais structure également l'organisation des espaces et des usages des sols environnants.

Pour saisir l'origine de ces formes et de ces contraintes, il est nécessaire d'examiner les étapes de conception et de construction des forts, qui conditionnent leur morphologie et leur empreinte actuelle.

2.4.3. Étapes de construction

La construction d'un fort Séré de Rivières relève d'un processus séquencé où décisions administratives, influences doctrinales, choix tactiques et opérations techniques s'articulent sous l'autorité de l'État-major, à travers le Comité de défense et le Service du Génie (Richard, 2007 ; Truttmann, 2017). Comprendre ce processus, à la fois standardisé par des instructions nationales et ajusté localement aux spécificités topographiques et foncières, permet d'expliquer la morphologie finale de l'ouvrage et d'identifier les empreintes morphologiques et foncières héritées de sa construction. La figure 2.23, inspirée des travaux de Truttmann (2017), synthétise quatorze étapes regroupées en quatre grandes phases allant de la conception à l'exécution du chantier.

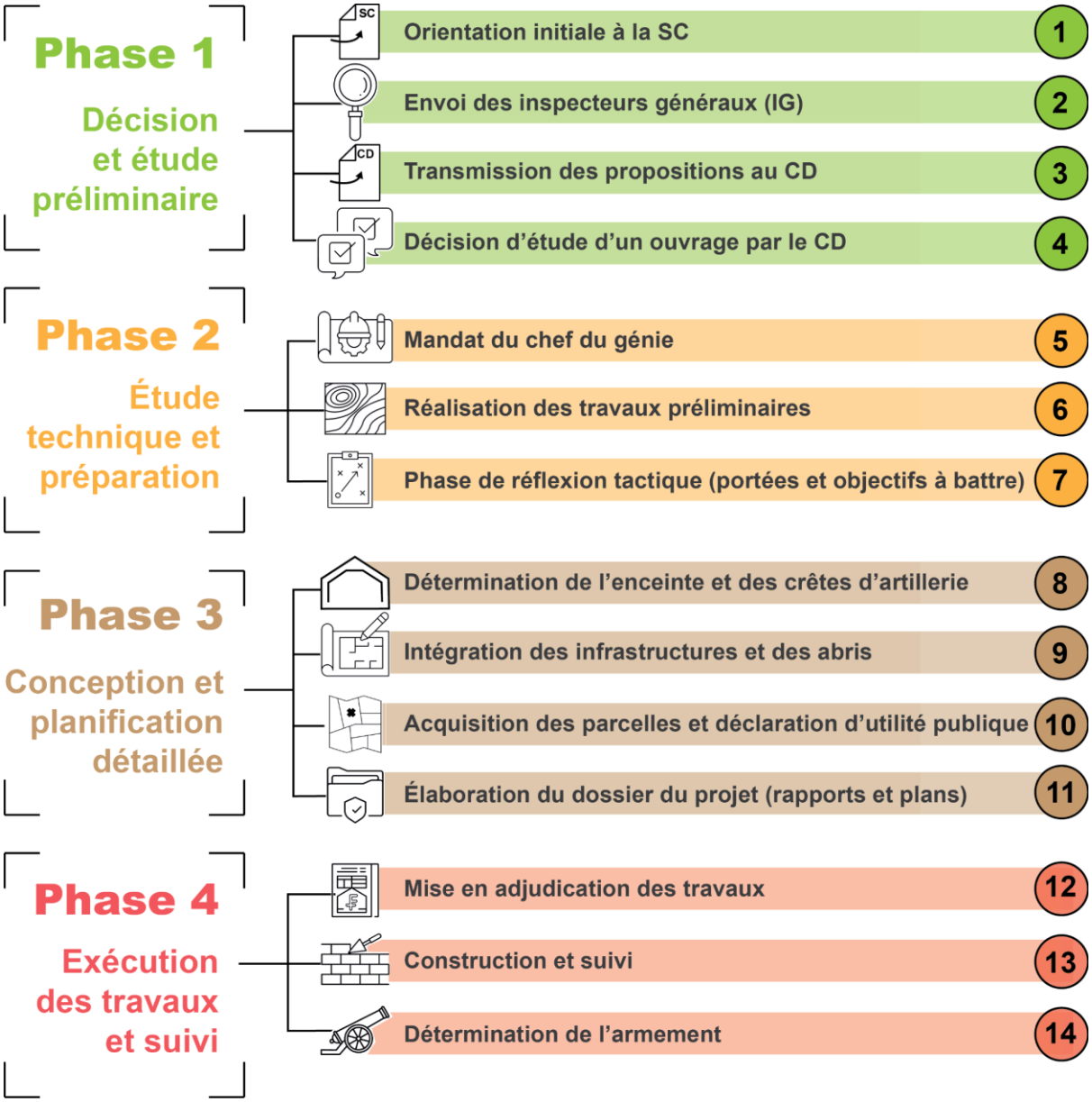


Figure 2.23 : Étapes de construction d'un fort Séré de Rivières (d'après Truttmann, 2017).

La première phase, de nature centralisée et descendante, est relative à *la prise de décision de construire l'ouvrage et aux études préliminaires*, initiées par l'État-major via le Comité de défense et le Service du Génie. Les inspecteurs-généraux se rendent sur le terrain pour évaluer les besoins et estimer les terrains potentiels et la pertinence stratégique des projets. Ces arbitrages sont déterminants sur le plan géographique, car ils fixent le site (souvent au sommet d'un relief ou en contrôle visuel d'un axe stratégique) et préfigurent les formes à venir. La morphogenèse du fort prend ainsi racine dans ces choix initiaux, qui conditionnent sa lecture topographique ultérieure. Cette phase se clôt par l'entérinement de la décision d'étude des ouvrages par le Comité de défense qui officialise le site et le projet retenus.

Avec la deuxième phase débute le temps long du projet, lorsque le mandat de construction est attribué au chef du Génie. Ce dernier, souvent capitaine spécialiste de la fortification et véritable cheville ouvrière du chantier, assure la maîtrise d'œuvre quotidienne et l'adaptation locale aux prescriptions nationales. Il dispose, conformément aux recommandations de Séré de Rivières invitant à « *laisser une large part aux sentiments* », d'une marge d'initiative pour ajuster les objectifs militaires aux contraintes topographiques, géotechniques, financières et foncières (Richard, 2007). Les *opérations préparatoires*, confiées à la brigade préparatoire (nivellement, sondages, terrassements d'essai, premiers traçages) servent à modéliser les lignes de tir pour déterminer les portées nécessaires. Bien que temporaires, ces travaux peuvent laisser des signatures morphologiques ténues (anciens tracés, vestiges de tranchée, *etc.*) difficilement caractérisables au LiDAR.

La phase 3 correspond à *la conception et à la planification détaillée* du fort et de son chantier. La morphologie définitive de l'ouvrage s'élabore d'abord dans la définition du périmètre polygonal de l'enceinte en fonction de la topographie locale et dans la détermination de la crête d'artillerie d'après les zones à battre, puis dans le choix du type de disposition des crêtes (massif central, cavalier, unique ; fig. 2.16A-C) et enfin dans l'intégration des structures internes (abris casematés, magasins, casernements, fossés, rampes, *etc.*). Sur le plan foncier, l'État obtient l'assise du projet par une procédure combinant déclaration d'utilité publique et expropriations (lois des 8 mars 1810, 7 juillet 1833 et 3 mai 1841) ou acquisitions de gré à gré (*i.e.*, achat à l'amiable). En parallèle, les marchés sont mis en adjudication (fig. 2.24) ou réalisés de gré à gré pour les plus restreints (annexe 5). Concernant les travaux, l'ouverture de carrières locales est entreprise et des autorisations « *d'occupations temporaires des terrains nécessaires à l'exécution des travaux publics* » sont accordées aux entrepreneurs pour qu'ils puissent utiliser temporairement certaines parcelles sans transfert de propriété (*e.g.*, chantier, voies d'acheminement de matériaux ; décret du 8 février 1868 ; annexe 6). Au-delà de la géométrie du projet, les démarches foncières et administratives inscrivent déjà le fort dans le tissu territorial, en bouleversant localement les

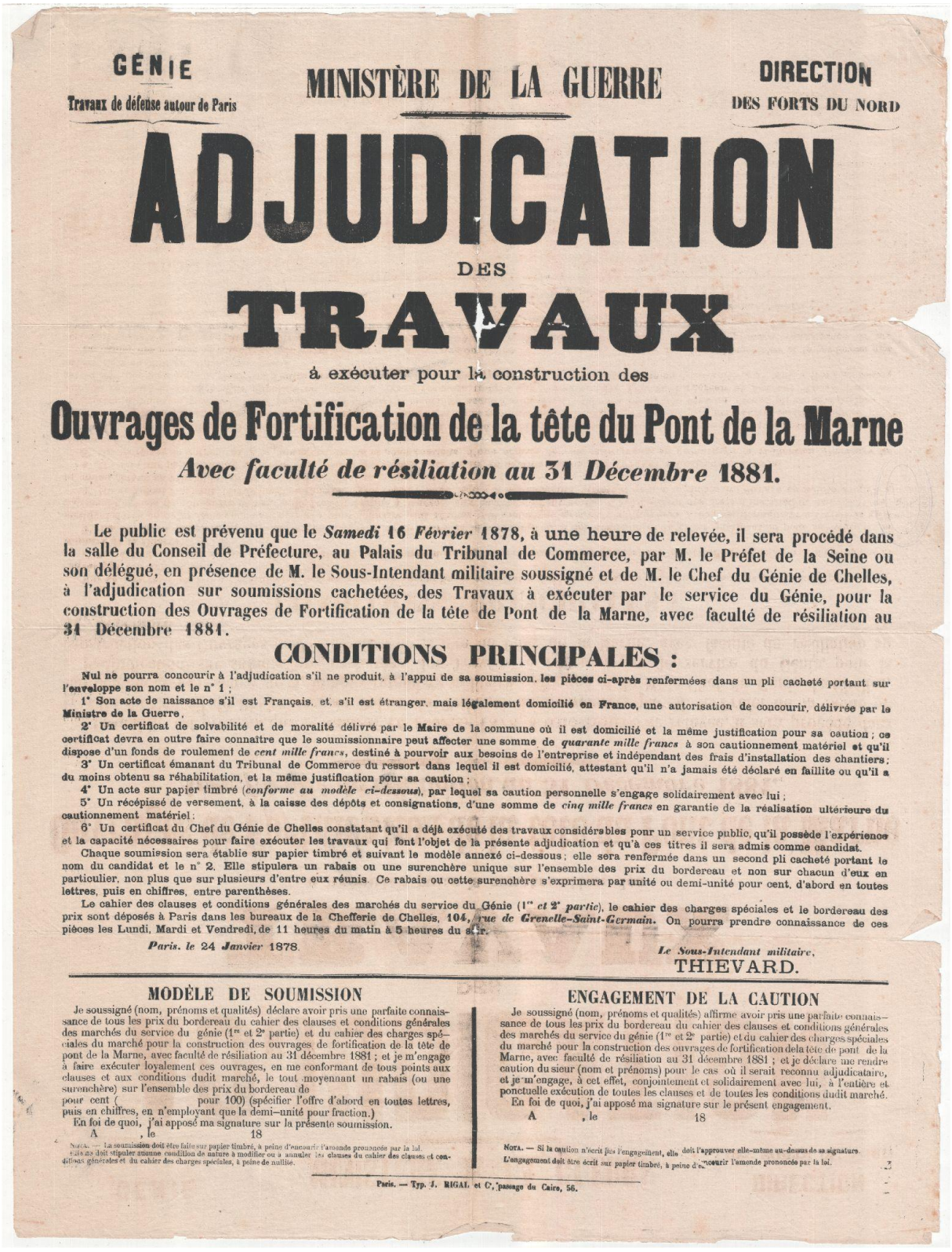
pratiques agropastorales et sylvicoles. Elles laissent ainsi une première empreinte spatiale qui préfigure l'empreinte topographique de la phase de construction.

Cette dernière correspond à la phase finale (phase 4) *d'exécution et de suivi des travaux*, qui mobilise simultanément main d'œuvre militaire et civile. Les chantiers s'étendent souvent sur plusieurs années et connaissent des ralentissements liés aux aléas météorologiques (*e.g.*, arrêt des travaux de maçonnerie pendant l'hiver ; Brolli, 1999) ou des difficultés logistiques. Celles-ci incluent, entre autres, la dégradation des voies d'accès sous l'effet d'une circulation intense. Ainsi à Bron (place de Lyon), le Conseil Général de l'Isère (1876) signale sur la chaussée « *une circulation journalière de quinze cents colliers [(i.e., chevaux)], se composant presque tous de lourds tombereaux appartenant aux entrepreneurs de travaux de construction du fort* ».

L'exécution est suivie par la réalisation d'une série de documents normés (registres d'attachement, cahiers des charges, bordereaux de prix, carnets d'officier) qui garantissent le suivi financier et technique. En principe, la création du fort donne également lieu à l'établissement des plans « des dessous » et « des dessus », d'une vignette et d'un atlas des bâtiments militaires.

Le creusement du fossé et l'édification du massif central façonnent progressivement le relief du fort, avec un casernement central généralement achevé en dernier. Cette séquence permet une mise en batterie anticipée sur les forts à batterie basse dès que les plateformes extérieures sont prêtes et fige les choix d'armement qui conditionnent l'organisation des terre-pleins et le positionnement des traverses.

Ces chantiers mobilisent principalement des terrassiers et des maçons mais requièrent aussi un éventail plus large de métiers, allant de l'extraction à la taille de la pierre à des métiers de finition (couverture, charpente, *etc.* ; *e.g.*, annexe 7). Les effectifs, variables selon les territoires et les périodes, rassemblent généralement de 600 à 1 000 ouvriers répartis sur plusieurs postes, avec un recours, dans certains cas, à une main-d'œuvre immigrée (*e.g.*, Belges, Italiens, Anglais, voire Allemands) et le renfort d'une ou plusieurs compagnies d'infanterie locales. L'encadrement technique est susceptible d'être assuré par un petit détachement du Génie, tandis que gendarmes et officiers du Génie veillent à la discipline et à la sécurité du chantier dans des bâtiments spécifiques (Richard, 2007).



GÉNIE

Travaux de défense autour de Paris

MINISTÈRE DE LA GUERRE

DIRECTION

DES FORTS DU NORD

ADJUDICATION

DES

TRAVAUX

à exécuter pour la construction des

Ouvrages de Fortification de la tête du Pont de la Marne

Avec faculté de résiliation au 31 Décembre 1881.

Le public est prévenu que le *Samedi* 16 *Février* 1878, à une heure de relevée, il sera procédé dans la salle du Conseil de Préfecture, au Palais du Tribunal de Commerce, par M. le Préfet de la Seine ou son délégué, en présence de M. le Sous-Intendant militaire soussigné et de M. le Chef du Génie de Chelles, à l'adjudication sur soumissions cachetées, des Travaux à exécuter par le service du Génie, pour la construction des Ouvrages de Fortification de la tête de Pont de la Marne, avec faculté de résiliation au 31 Décembre 1881.

CONDITIONS PRINCIPALES :

Nul ne pourra concourir à l'adjudication s'il ne produit, à l'appui de sa soumission, les pièces ci-après renfermées dans un pli cacheté portant sur l'enveloppe son nom et le n° 1 ;

1° Son acte de naissance s'il est Français, et, s'il est étranger, mais légalement domicilié en France, une autorisation de concourir, délivrée par le Ministre de la Guerre ;

2° Un certificat de solvabilité et de moralité délivré par le Maire de la commune où il est domicilié et la même justification pour sa caution ; ce certificat devra en outre faire connaître que le soumissionnaire peut affecter une somme de *quarante mille francs* à son cautionnement matériel et qu'il dispose d'un fonds de roulement de *cent mille francs*, destiné à pourvoir aux besoins de l'entreprise et indépendant des frais d'installation des chantiers ;

3° Un certificat émanant du Tribunal de Commerce du ressort dans lequel il est domicilié, attestant qu'il n'a jamais été déclaré en faillite ou qu'il a du moins obtenu sa réhabilitation, et la même justification pour sa caution ;

4° Un acte sur papier timbré (*conforme au modèle ci-dessous*), par lequel sa caution personnelle s'engage solidairement avec lui ;

5° Un récépissé de versement, à la caisse des dépôts et consignations, d'une somme de *cinq mille francs* en garantie de la réalisation ultérieure du cautionnement matériel ;

6° Un certificat du Chef du Génie de Chelles constatant qu'il a déjà exécuté des travaux considérables pour un service public, qu'il possède l'expérience et la capacité nécessaires pour faire exécuter les travaux qui font l'objet de la présente adjudication et qu'à ces titres il sera admis comme candidat.

Chaque soumission sera établie sur papier timbré et suivant le modèle annexé ci-dessous ; elle sera renfermée dans un second pli cacheté portant le nom du candidat et le n° 2. Elle stipulera un rabais ou une surenchère unique sur l'ensemble des prix du bordereau et non sur chacun d'eux en particulier, non plus que sur plusieurs d'entre eux réunis. Ce rabais ou cette surenchère s'exprimera par unité ou demi-unité pour cent, d'abord en toutes lettres, puis en chiffres, entre parenthèses.

Le cahier des clauses et conditions générales des marchés du service du Génie (1re *et* 2e *partie*), le cahier des charges spéciales et le bordereau des prix sont déposés à Paris dans les bureaux de la Chefferie de Chelles, 104, *rue de Grenelle-Saint-Germain*. On pourra prendre connaissance de ces pièces les Lundi, Mardi et Vendredi, de 11 heures du matin à 5 heures du soir.

Paris. le 24 *Janvier* 1878.

Le Sous-Intendant militaire,
THIEVARD.

MODÈLE DE SOUMISSION

Je soussigné (nom, prénoms et qualités) déclare avoir pris une parfaite connaissance de tous les prix du bordereau du cahier des clauses et conditions générales des marchés du service du génie (1re et 2e partie) et du cahier des charges spéciales du marché pour la construction des ouvrages de fortification de la tête de pont de la Marne, avec faculté de résiliation au 31 décembre 1881 ; et je m'engage à faire exécuter loyalement ces ouvrages, en me conformant de tous points aux clauses et aux conditions dudit marché, le tout moyennant un rabais (ou une surenchère) sur l'ensemble des prix du bordereau de
pour cent (pour 100) (spécifier l'offre d'abord en toutes lettres, puis en chiffres, en n'employant que la demi-unité pour fraction.)
En foi de quoi, j'ai apposé ma signature sur la présente soumission.
A , le 18

NOTA. — La soumission doit être faite sur papier timbré, à peine d'encourir l'amende prononcée par la loi.
Elle ne doit stipuler aucune condition de nature à modifier ou à annuler les clauses du cahier des clauses et conditions générales et du cahier des charges spéciales, à peine de nullité.

ENGAGEMENT DE LA CAUTION

Je soussigné (nom, prénoms et qualités) affirme avoir pris une parfaite connaissance de tous les prix du bordereau du cahier des clauses et conditions générales des marchés du service du génie (1re et 2e partie) et du cahier des charges spéciales du marché pour la construction des ouvrages de fortification de la tête de pont de la Marne, avec faculté de résiliation au 31 décembre 1881 ; et je déclare me rendre caution du sieur (nom et prénoms) pour le cas où il serait reconnu adjudicataire, et je m'engage, à cet effet, conjointement et solidairement avec lui, à l'entière et ponctuelle exécution de toutes les clauses et de toutes les conditions dudit marché.
En foi de quoi, j'ai apposé ma signature sur le présent engagement.
A , le 18

NOTA. — Si la caution n'écrit pas l'engagement, elle doit l'approuver elle-même au-dessous de sa signature.
L'engagement doit être écrit sur papier timbré, à peine d'encourir l'amende prononcée par la loi.

Paris. — Typ. J. RIGAL et Cie, passage du Caire, 56.

Figure 2.24 : Affiche relative à l'adjudication des travaux de construction du fort de Villiers (1878-1880 ; Noisy-le-Grand ; ceinture fortifiée de Paris ; archives personnelles).

Brolli (1999) souligne que les entrepreneurs se heurtent fréquemment aux exigences du Génie, nourries par la crainte d'une nouvelle guerre et par des contraintes budgétaires, ce qui complexifie l'exécution des travaux. Dès l'époque, des acteurs contemporains comme Doussaud (1879) dans un réquisitoire adressé à l'opinion, dénoncent publiquement l'absence de plans précis et d'études de sols lors des adjudications, la vitesse d'exécution imposée en contradiction avec les marchés et la « *substitution du Génie aux entrepreneurs* », transformant les marchés publics en régies déguisées (*i.e.*, marchés publics où l'entrepreneur n'a plus d'autonomie et n'est plus qu'un exécutant des ordres de l'administration). À ces contraintes s'ajoutent des pénuries de main-d'œuvre, une inflation des salaires (grèves, concurrence), des fausses manœuvres liées à l'arrivée trop précoce de certaines garnisons et des surcoûts imprévus. Ces facteurs expliquent la multiplication des polémiques médiatisées et des contentieux judiciaires. Doussaud recense par exemple des entrepreneurs ruinés et des expulsions de chantiers par la gendarmerie et note qu'à Belfort, cinq marchés sur six sont portés en justice (Brolli, 1999).

Les contraintes et tensions observées sur les chantiers ont également laissé des traces visibles dans la matérialité des forts (zones inachevées, ruptures de pente, hétérogénéités de matériaux), autant de signatures potentielles susceptibles d'influencer l'interprétation morphologique des fortifications Séré de Rivières.

Comprendre ces étapes successives permet ainsi de saisir que la forme finale du fort n'est pas un modèle figé mais le résultat d'un enchaînement d'actions stratégiques, législatives, financières, techniques et militaires. Loin d'être uniquement des constructions militaires, les forts Séré de Rivières apparaissent comme des objets complexes, hybrides entre architecture, topographie et végétation, dont l'organisation interne et les logiques défensives façonnent des formes spécifiques dans le relief. C'est à travers l'analyse fine de ces morphologies révélées par le LiDAR que l'on peut aujourd'hui reconstituer leur structure initiale (morphogenèse), mesurer les effets du temps et de la guerre (héritages) et interroger les dynamiques de transformation de ces paysages fortifiés.

L'analyse de ce premier cycle constructif éclaire la logique interne du système Séré de Rivières et sert de cadre de référence pour appréhender la rupture doctrinale qui s'amorce dès 1885 avec la crise de l'obus-torpille, développée dans la section suivante.

2.5. Crise de l'obus-torpille et transformations du système (1885-1914)

À peine achevée, la première génération de forts Séré de Rivières est confrontée à une remise en cause radicale de ses principes fondateurs, consécutive aux bouleversements technologiques introduits dans l'artillerie lourde. Cette rupture doctrinale et technique inaugure une nouvelle phase de la fortification marquée par l'essor du béton et du cuirassement au détriment de la maçonnerie polygonale et du blindage en terre, par un enfouissement accru des ouvrages, mais aussi par l'abandon ou le déclassement progressif de certains forts jugés trop exposés ou trop coûteux à moderniser (Truttmann, 2017).

Loin d'être une simple actualisation technique, cette transition redéfinit les modes de construction et d'usage des fortifications ainsi que leur expression morphologique, dont les empreintes apparaissent aujourd'hui dans les morphologies composites mises en évidence par les modèles LiDAR. Saisir les implications morphogénétiques de cette crise de l'obus-torpille est donc une étape clé pour replacer les formes actuelles dans une chronologie de transformation de ces reliefs militarisés.

2.5.1. Crise de l'obus-torpille

La crise de l'obus-torpille est déclenchée par la succession de trois innovations militaires que sont la stabilisation chimique et l'industrialisation de la poudre sans fumée (poudre B ; 1884), de la mélinite (1885) et des obus cylindriques ogivaux à explosif « brisant » (1886) neutralisant la capacité de résistance de l'ensemble des ouvrages Séré de Rivières (Rocolle, 1973). Les fusées percutantes à retard déclenchent désormais les explosions après pénétration dans la masse, menaçant directement les structures enterrées. À cela s'ajoute la généralisation des tirs indirects, qui réduit l'efficacité des dispositifs de protection traditionnels (crêtes, glacis, défilement). Cette interprétation, largement fondée sur les résultats des tirs de la Malmaison (1886), a toutefois été nuancée par des essais ultérieurs menés en 1908 au fort de Saint-Antoine. Ces derniers ont mis en évidence le rôle déterminant du contexte géologique dans la résistance des ouvrages, la vulnérabilité de la Malmaison étant en partie liée à la nature meuble de son site d'implantation, avec, à l'inverse, des forts implantés en milieu rocheux présentant une capacité de résistance nettement supérieure (Truttmann, 2017).

Les implications de cette crise sont majeures pour des forts désormais qualifiés de « *nids à bombes* » (ESTG, 1972). Les plateformes d'artillerie en ciel ouvert deviennent inexploitables car trop vulnérables à la concentration de l'artillerie adverse, la nature terreuse et le défilement des parapets perdent leur pertinence, et les reliefs saillants (*e.g.*, caponnières)

deviennent des cibles trop vulnérables. La résistance supposée du massif de terre est elle-même remise en cause.

Cette obsolescence est rapidement confirmée par des essais menés à l'étranger (Kösel et Kümmersdorf en Allemagne, Lydd en Angleterre) et en France, notamment au fort de la Malmaison en 1886 (12 km au sud-ouest de Laon ; fig. 2.25A-C ; Ministère de la Guerre, 1886). Les tirs y provoquent des entonnoirs profonds, dont des perforations des voûtes, et des destructions significatives des murs d'escarpe. Le rapport de l'armée française conclut à l'incapacité de ces ouvrages à résister plus d'une journée à un bombardement moderne (fig. 2.25C). Bien qu'en réalité le pouvoir brisant de la mélinite, environ deux fois supérieur à celui de la poudre noire, y ait été amplifié par un terrain très favorable à la pénétration (ESTG, 1972), elle n'en provoque pas moins des bouleversements majeurs dans les principes de conception et de protection des fortifications, sur des plans techniques et stratégiques.

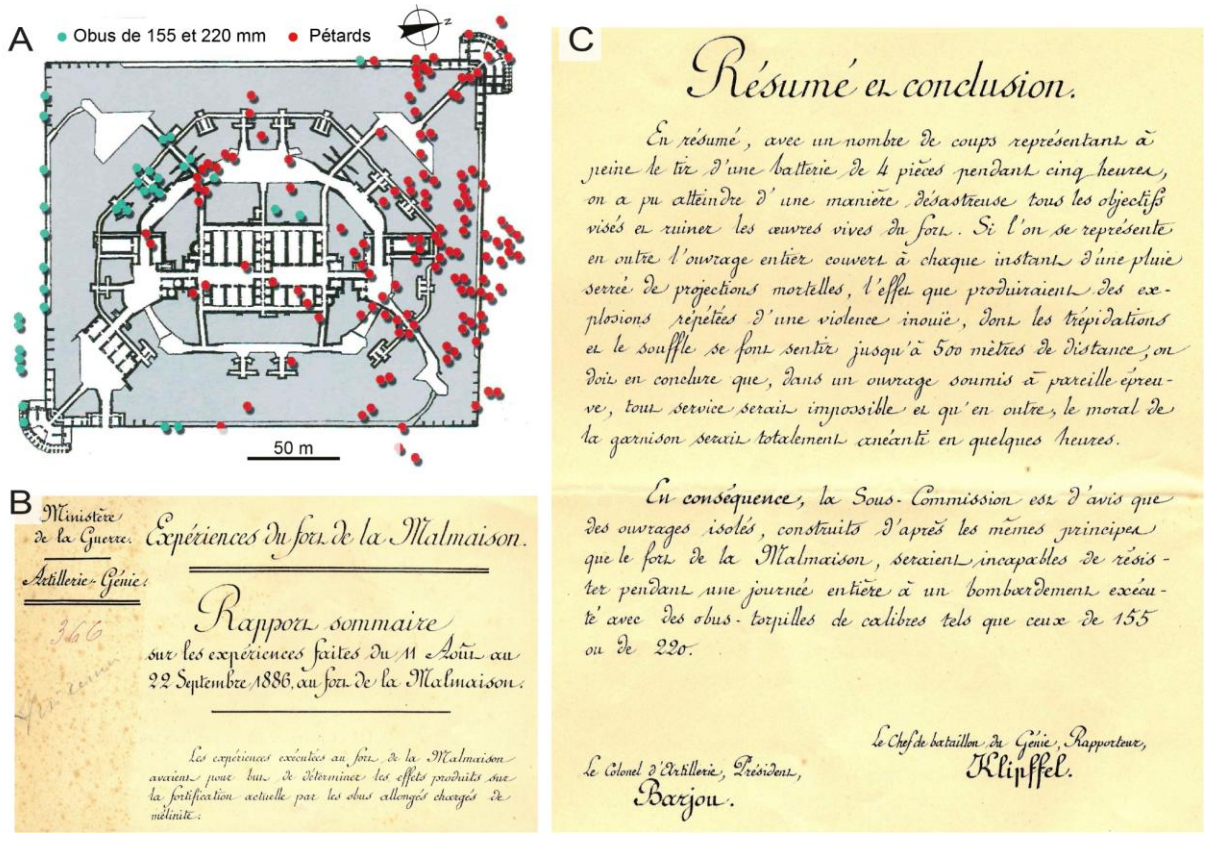


Figure 2.25 : Documents relatifs aux expériences menées sur le fort de la Malmaison (été 1886) suite à la crise de l'obus-torpille. A : Schéma des impacts (Dépret, 2016 ; d'après un dessin de Martin Barros) ; B : Introduction du rapport sommaire (archives personnelles) ; C : Conclusion du rapport sommaire (archives personnelles).

2.5.2. Incidences techniques sur les structures des forts

L'ampleur des transformations nécessaires après 1885 rend impossible une réadaptation uniforme du système fortifié. Dans ce contexte, une politique de modernisation sélective est mise en place, instituant un système à plusieurs vitesses formalisé par différents textes législatifs (Guillot, 1949 ; Rocolle, 1973 ; Truttmann, 2017) :

- un décret de 1887 déclassant une quarantaine de vieilles places du Pré Carré de Vauban ;

- la loi Freycinet de 1899 répartissant les ouvrages en trois catégories (à moderniser, à maintenir comme appui éventuel aux armées de campagne, ou à abandonner, c'est-à-dire absence d'armement et d'entretien) ;

- la loi du 17 juillet 1912 déclassant officiellement plusieurs forts d'arrêt ainsi que les places de seconde ligne de Reims, Laon et La Fère.

De manière générale, l'ordre est à la dispersion de l'artillerie dans des batteries annexes de campagne défendues par des fortifications légères. Seuls les grands camps retranchés de première ligne (Verdun, Toul, Épinal, Belfort) font l'objet de profondes modernisations, alors que les places secondaires et les forts de seconde ligne, comme ceux de la côte d'Île-de-France, ne sont peu voire pas adaptés, certains étant réaménagés comme points d'appui ou déclassés (Guillot, 1949 ; Rocolle, 1973 ; Truttmann, 2017).

Ces choix techniques se traduisent par des transformations morphologiques majeures qui affectent l'organisation et la lecture des polémoformes (fig. 2.26A-C) : superposition du béton sur la maçonnerie (fig. 2.27A-C), renforcement et enfouissement accru des voûtes, remplacement des murs d'escarpe par des grilles métalliques, abaissement du profil général, des pentes de l'escarpe et du rempart, suppression des caponnières au profit de coffres de flanquement en contrescarpe (l'inverse dans la gorge), relocalisation des magasins à poudre dans des volumes profondément enfouis, souvent sous roc, *etc.*

À ces évolutions s'ajoutent de nouvelles structures issues des choix techniques opérés dans l'élan de la révolution industrielle (béton spécial puis béton armé, métal pour portes et blindages), qui introduisent des formes inédites dans le paysage : tourelles cuirassées pour l'artillerie lourde et légère (*e.g.*, tourelle de 75 mm), observatoires cuirassés, guérites-observatoires et projecteurs blindés modèlent localement les crêtes ; les casemates sous béton pour l'artillerie (casemates de flanquement dites « de Bourges ») se généralisent tandis que les casemates en fer laminé et fonte dure du système Mougin restent ponctuelles ; le blindage des structures d'intendance finit par être assuré par d'épaisses dalles de béton coulées au-dessus.

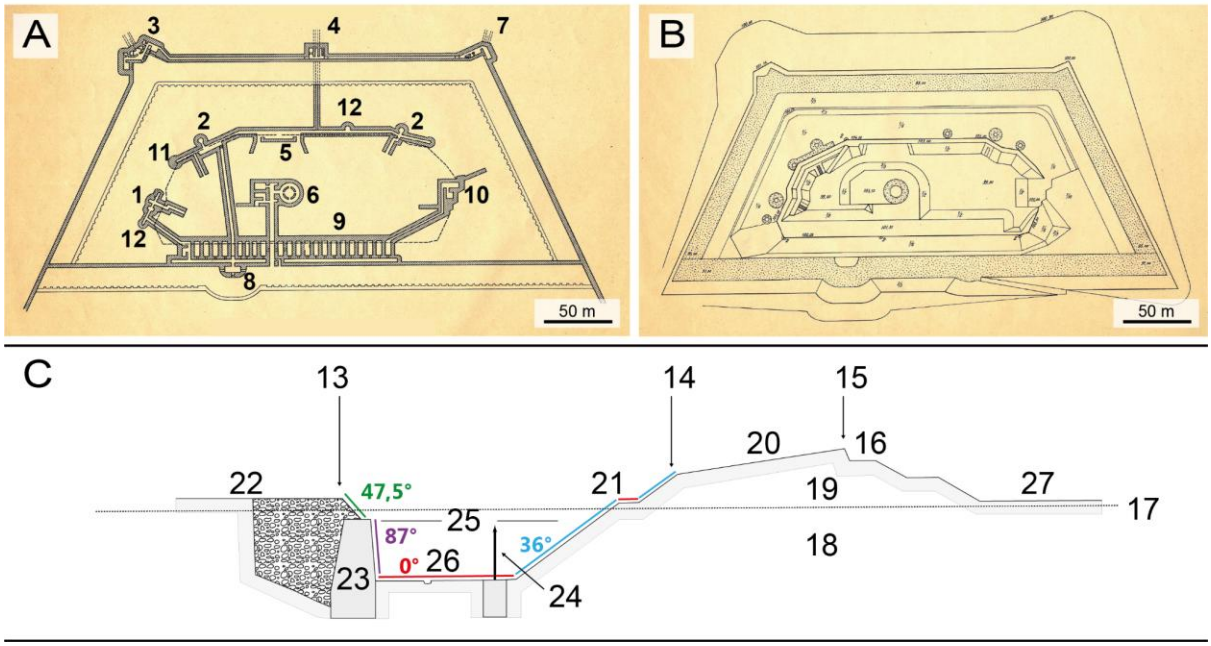


Figure 2.26 : Type de fort employé après 1885 (d'après Guillot, 1949). A : Plan des dessous théorique ; B : Plan des dessus théorique ; C : Profil théorique du rempart (les pentes théoriques du fossé sont indiquées en couleur) .1 : Tourelle pour deux canons de 75 ; 2 : Tourelle pour mitrailleuses ; 3 : Coffre double ; 4 : Système de contremines ; 5 : Abris de rempart ; 6 : Tourelle de 155R ; 7 : Coffre simple ; 8 : Caponnière ; 9 : Casernement ; 10 : Casemate de Bourges ; 11 : Observatoire de commandement ; 12 : Observatoire de tir ; 13 : Crête du chemin couvert ; 14 : Crête extérieure ; 15 : Crête intérieure ; 16 : Banquettes de tir ; 17 : Niveau de sol naturel ; 18 : Rempart ; 19 : Parapet ; 20 : Plongée ; 21 : Talus extérieur (escarpe en terre coulante) ; 22 : Glacis ; 23 : Mur de contrescarpe ; 24 : Grille d'escarpe ; 25 : Fossé ; 26 : Fond du fossé ; 27 : Cour de l'ouvrage.

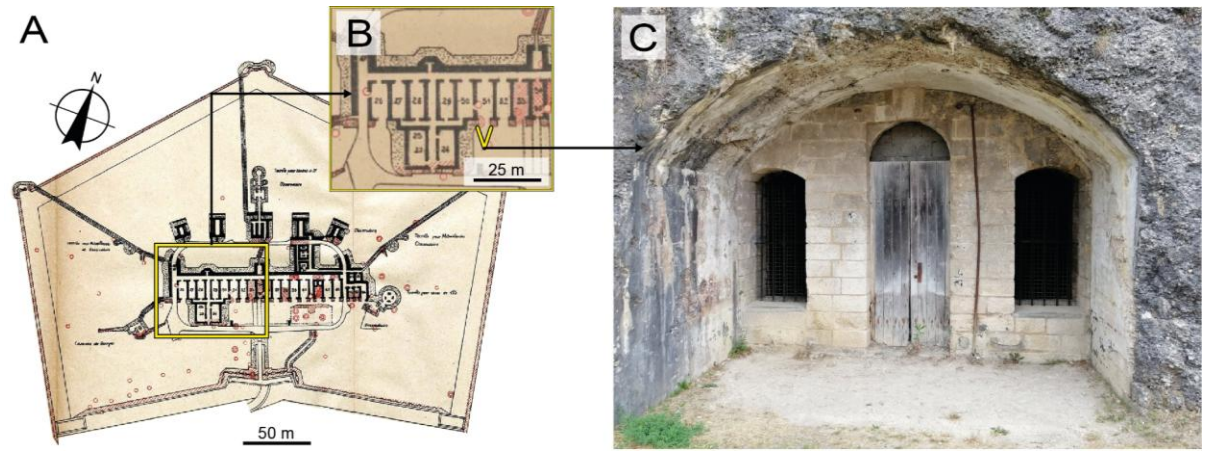


Figure 2.27 : Fort de Douaumont (place de Verdun) dont la maçonnerie d'origine est recouverte d'un béton de renforcement ajouté lors des modernisations postérieures à la crise de l'obus-torpille. A : Plan des dessous du fort de Douaumont à la fin de la Première Guerre mondiale (Tournoux, 1927) ; B : Agrandissement de la partie ouest du casernement ; C : Casemate n°31 avec maçonnerie d'origine recouverte d'une chape de béton et baies avec restes de blindage (cl. et légende : Florian Garnier).

En parallèle, la structuration souterraine se développe, avec la création de gaines reliant les organes vitaux à la caserne centrale. Cette emprise verticale et enfouie, souvent invisible en surface, complexifie l'analyse morphologique et appellent d'autant plus à une lecture croisée des documentations archivistiques et de terrain avec les modèles LiDAR, voire à l'utilisation

de méthodes complémentaires (*e.g.*, LiDAR terrestre, photogrammétrie), pour reconstituer la morphogenèse et évaluer les héritages géomorphologiques de ces reliefs militarisés.

2.5.3. Incidences doctrinales et stratégiques

Les mutations techniques et morphologiques décrites dans la section précédente s'inscrivent dans un contexte doctrinal et stratégique en recomposition. Bien que profondément remis en cause par la crise de l'obus-torpille, le système de fortification initié sous Séré de Rivières n'est pas abandonné avant la Première Guerre mondiale. Il fait toutefois l'objet d'un processus d'épuration progressive, qui se traduit matériellement par la modernisation sélective d'une partie des ouvrages et l'abandon des autres, et juridiquement par l'ensemble de textes législatifs précédemment évoqués (décret de 1887, loi Freycinet de 1899, loi du 17 juillet 1912). Ce tri institutionnalisé marque une rupture avec l'ambition initiale d'un maillage défensif continu et homogène du territoire et produit des trajectoires morphologiques contrastées : forts modernisés, hybrides ou laissés en déshérence.

Un second programme de fortification est ainsi lancé à partir de 1888, quatorze ans après la première phase, afin de moderniser une sélection restreinte d'ouvrages, et d'en créer ponctuellement (lois des 26 juin et 30 décembre 1888 ; Truttmann, 2017). Cette sélection devient indispensable en raison de l'explosion des coûts (le prix de revient d'un fort modernisé est multiplié par deux) et du vote limité des crédits à l'Assemblée nationale la même année (82 millions de francs-or pour le Génie et 36 millions pour l'artillerie). À partir de 1888, la majorité des ouvrages nouvellement construits ou profondément remaniés ne relèvent plus, à proprement parler, du système Séré de Rivières (Truttmann, 2017). Ils s'inscrivent dans une phase transitoire qui annonce les principes de la fortification du XXe siècle. Les ouvrages cessent d'être des ensembles monolithiques pour devenir des dispositifs éclatés, plus difficiles à repérer et à neutraliser. Leurs profils sont abaissés et simplifiés, le flanquement des fossés n'est plus assuré par des caponnières mais par l'infanterie depuis les dessus, et la protection repose désormais sur des casemates et cuirassements bétonnés, associés à des effectifs réduits. La construction en béton spécial, et plus marginalement en béton armé, devient alors la norme.

Ces restrictions budgétaires s'inscrivent dans un contexte géopolitique et doctrinal en mutation (Rocolle, 1973). Le sentiment d'urgence initiale s'atténue progressivement, à mesure que l'armée française se réorganise et se modernise (*cf.* parties 2.2.2 et 2.2.3), que la diplomatie allemande se modifie après la chute de Bismarck en 1890 et que l'alliance franco-russe est consolidée (1892-1893 ; Milza, 2014). Sur le plan intérieur, les priorités parlementaires évoluent à la fin du XIXe siècle. Le boulangisme (1885-1891) détourne un

temps l'attention lorsqu'une certaine sensibilité pacifiste se développe dans la société française (Bouchard et Guieu, 2019).

Parallèlement, un basculement doctrinal se produit dans les cercles militaires où la guerre n'est plus conçue comme un affrontement défensif, mais comme une offensive rapide et décisive (Diest, 2023). Selon Rocolle (1973), cette dynamique fait de l'offensive « *l'axiome de la pensée militaire française* », qui culminera dans la doctrine de « *l'offensive à outrance* » prônée par Joffre dès la fin de la décennie 1900-1910. Ces critiques se traduisent par une remise en cause croissante de la fortification permanente et du système Séré de Rivières, accusé d'immobilisme. Alors que Séré de Rivières est écarté dès 1879-1880, la fortification permanente est perçue comme une entrave à l'esprit d'offensive par des officiers tels que le Général Pierron (1889), qui propose un recueil de textes à charge de plus de 700 pages ou le Capitaine Gilbert énonçant : « *la fortification permanente ruine dans la troupe et dans le commandement l'esprit d'offensive et, loin d'augmenter la résistance de l'armée, la condamne à l'ataxie et à la dispersion, occupant trop de monde et immobilisant la manœuvre* » (Engerand, 1918). En Allemagne également, de nombreux officiers prussiens théorisent la vulnérabilité des fortifications françaises face à l'artillerie moderne, tels que le chef du bataillon du Génie Pochhammer en 1883 et le lieutenant-colonel du Génie Heyde en 1886 (Pierron, 1889), ou le Général Von Sauer (1885).

La planification militaire devient ainsi un révélateur de ces nouvelles tensions entre contraintes budgétaires, reconfigurations géopolitiques, évolutions doctrinales et perte de crédit progressive du système Séré de Rivières (Rocolle, 1973). Les plans de mobilisation élaborés entre 1875 et 1914 reflètent clairement cette évolution stratégique. Les premiers (1875-1886) témoignent d'une logique défensive prudente centrée sur la couverture du territoire et le respect des neutralités frontalières. À partir de 1887, une inflexion vers une posture plus offensive apparaît, fondée sur la recherche de l'initiative et de la manœuvre, et culmine avec le plan XVII (1914) qui repose sur l'hypothèse d'une attaque rapide en Alsace et en Lorraine.

2.5.4. Les forts pendant la guerre

L'utilisation effective des fortifications durant la Première Guerre mondiale met en lumière cette ambivalence entre vulnérabilité et réinvestissement militaire. Dans la guerre de mouvement de 1914, plusieurs places fortes et forts d'arrêt de la frontière septentrionale (*e.g.*, Liège et Namur en Belgique, Maubeuge, mais aussi Longwy, Charlemont et les Ayvelles) ralentissent l'offensive allemande et perturbent ses lignes de progression (Dépret et Diest, 2021). Comme le souligne Diest (2023), cette résilience fonctionnelle tient moins à la fortification permanente en tant que doctrine qu'à son intégration ponctuelle et improvisée dans les plans d'opération, comme l'illustre l'organisation d'un camp retranché à Lille par le général Herment en août 1914. Leur chute rapide sous l'artillerie de siège moderne confirme toutefois les critiques formulées depuis les années 1880 contre les fortifications maçonnées de première génération (Diest, 2023). Le risque d'asphyxie au monoxyde de carbone (explosion des obus) et le pilonnage conduisent à limiter les garnisons à ce qui est strictement nécessaire pour le service des pièces sous cuirasse et à organiser la défense en périphérie des ouvrages (Rocolle, 1939, 1973).

Avec la stabilisation du front à l'automne 1914 (guerre de position), les places passent pour la plupart en arrière de la ligne de feu. Cela incite le ministère de la Guerre à rétablir la possibilité (disparue après 1871) de ponctionner leurs ressources en temps de guerre (décrets du 5 août). Dans son instruction générale sur le rôle des places fortes du 9 août 1915, le général Joffre stipule finalement que les « *ouvrages permanents doivent être utilisés dans les lignes de défense successives, en liaison avec celles des Armées voisines, et non dans des organisations concentriques au noyau central* » et que « *les places ne doivent, en aucun cas, être défendues pour elles-mêmes* » (Rocolle, 1973).

Certaines places modernisées comme Verdun retrouvent toutefois un rôle stratégique central. La densité des ouvrages créés ou renforcés avant 1914 permet d'y soutenir une défense organisée et prolongée, la bataille de Verdun en constituant l'illustration la plus marquante (février-octobre 1916). Un programme de remise à niveau, les « travaux 17 », est engagé dès l'été 1916 sur la base des leçons des premiers bombardements massifs (fig. 2.28A-D). Il consiste à enterrer et relier en profondeur casernes, postes de commandement, abris d'intendance et organes actifs par des gaines situées entre 5 et 15 m de profondeur, afin de protéger les soldats et les liaisons avec l'arrière des explosions, des éclats, du vacarme et des risques chimiques et de maintenir les relèves en plein pilonnage. Dès lors, les forts, jusque-là simples points d'appui vulnérables, deviennent véritablement des centres de résistance intégrés et viables sous le feu de l'artillerie lourde.

Ainsi, la Première Guerre mondiale révèle la double nature des forts : fragilisés par l'artillerie, mais réinvestis et adaptés en centres de résistance et d'observation. À Verdun

comme, dans un autre registre, autour de Reims où des ouvrages déclassés sont intégrés aux réseaux de défense (*cf.* partie 3.2.3), ces trajectoires contrastées complexifient la fonction et surtout la morphologie des forts justifiant de les considérer comme des « *méga-polémoformes* », représentant les formes individuelles les plus conséquentes du champ de bataille (Taborelli et al., 2017b).

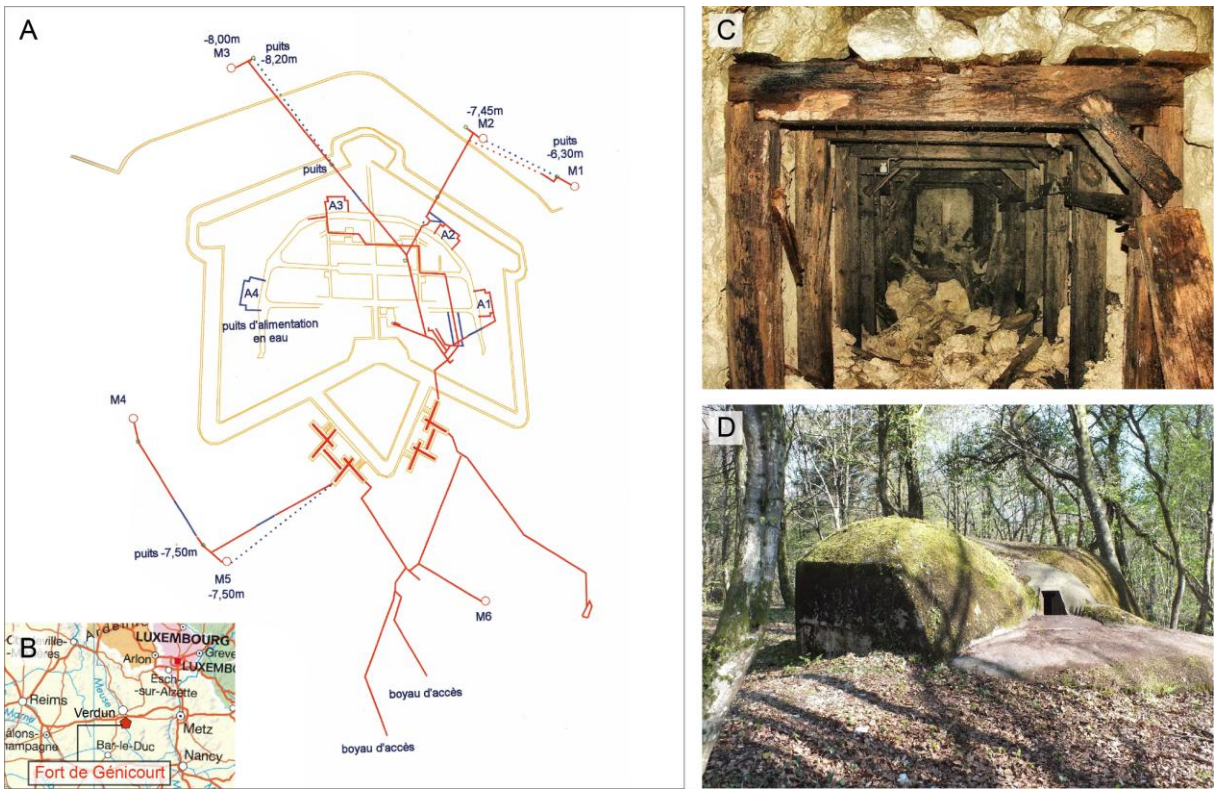


Figure 2.28 : Exemple de « travaux 17 » menés sur des forts autour de Verdun. A : Travaux 17 menés sur le fort de Génicourt (Triolet J. et Triolet L., 2011) ; B : Localisation du fort de Génicourt au sud de Verdun (rideau des Hauts-de-Meuse) ; C : Galerie au fort de Moulainville (place de Verdun ; Garnier, 2016) ; D : Cloche Pamart M4 du fort de Tavannes (coupole en acier pour mitrailleuse ; place de Verdun ; cl : scramasaxe).

Ces dynamiques de réinvestissement ne s'interrompent pas avec l'armistice (Truttmann, 2009). Les travaux souterrains réalisés ou amorcés pendant la guerre sont fréquemment réutilisés après 1918 et font l'objet d'adaptations, notamment par le bétonnage partiel ou total des locaux, comme au fort de Bessoncourt (place de Belfort). Par ailleurs, les forts de la place de Verdun, fortement endommagés durant les combats, sont réparés à partir des années 1930 afin d'être intégrés en seconde ligne du dispositif de la ligne Maginot. Les couronnes en béton des tourelles sont reprises, les casemates de flanquement ou de Bourges réparées ou reconstruites, et les tourelles remises en état lorsque leur degré de destruction le permet. Ces interventions prolongent et fixent dans la durée les transformations morphologiques engagées pendant la Première Guerre mondiale.

Conclusion du chapitre 2

En conclusion, cette rétrospective sur la genèse du système Séré de Rivières permet de dégager plusieurs enseignements.

Le XIXe siècle marque une césure stratégique et technologique majeure dans l'histoire de la fortification, souvent qualifiée d'*âge des forts*. Cette période se distingue de l'*âge des places* frontalières aux forts bastionnés héritées de Vauban, par l'adoption d'un modèle fondé sur des forts polygonaux détachés disposés isolément, en ceintures, en réseaux concentriques ou en rideaux destinés à barrer les axes de pénétration ennemis sur la profondeur du territoire. Elle précède l'*âge des positions*, qui s'impose à partir de la Première Guerre mondiale, où la fortification se fond dans des positions continues et enterrées (Rocolle, 1973).

Pensé dans l'urgence de l'après-1871, le système Séré de Rivières incarne cette phase intermédiaire, ambitieuse dans sa conception mais rapidement déstabilisée par l'accélération des innovations balistiques. L'augmentation de la puissance de feu, symbolisée par l'apparition de l'obus-torpille, précipite une crise de la fortification qui conduit à la fois à une recomposition doctrinale (éloge militaire de l'offensive) et à des expérimentations techniques (béton, cuirassements, enfouissement, défilement) tentant d'articuler la fortification permanente avec la fortification de campagne. La logique d'un système homogène initialement pensé par le général Séré de Rivières cède ainsi progressivement la place à une organisation à plusieurs vitesses, où coexistent forts modernisés, hybrides, obsolètes, voire abandonnés.

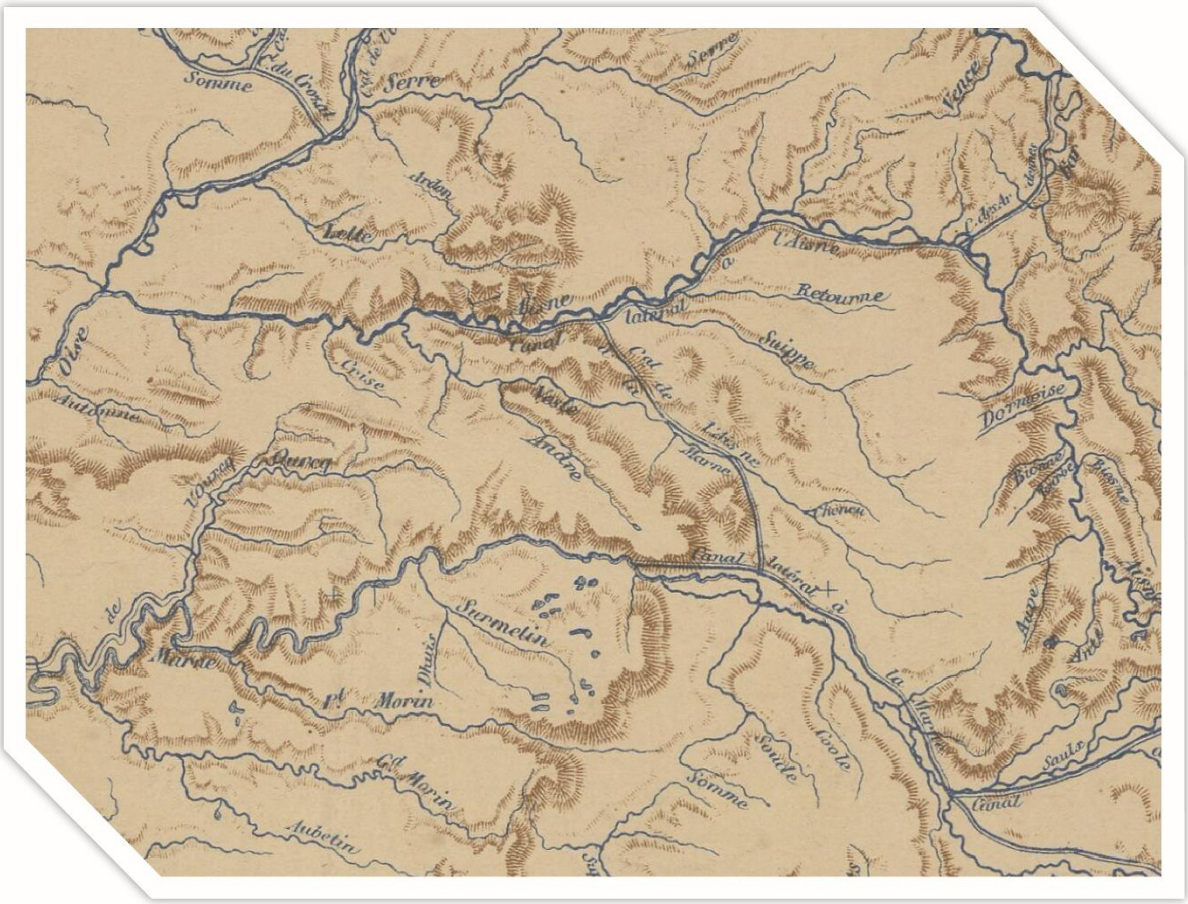
À la veille de 1914, le système Séré de Rivières apparaît en continuité avec la tradition militaire française de couverture du territoire et de verrouillage des axes stratégiques, en intégrant les progrès techniques et stratégiques du milieu du XIXe siècle (chemin de fer, artillerie rayée, géographie militaire). Il est cependant fragilisé par les évolutions ultérieures qui remettent en cause ses fondements (crise de l'obus-torpille, concentration des troupes mobiles, offensive à outrance, *etc.*). Malgré cela, il se révèle résilient par sa capacité d'adaptation et d'intégration dans de nouvelles doctrines défensives, certains de ses principes préfigurant finalement les conceptions développées dans l'entre-deux-guerres, jusqu'à la ligne Maginot (dispersion, couverture mutuelle ou l'organisation souterraine ; Truttmann, 2009).

Pourtant, au moment où éclate la Première Guerre mondiale, les forts, même lorsqu'ils sont considérés comme dépassés, retrouvent une forme d'efficacité stratégique inattendue. Certains s'effondrent face aux assauts de l'artillerie lourde, notamment lors de la guerre de mouvement, d'autres, comme ceux de Verdun ou de Reims, deviennent des points

d'ancrage logistique et défensif dans la guerre de position. Ces usages différenciés soulignent la résilience partielle du système et la complexité de ses trajectoires militaires et paysagères.

Les formes actuelles du paysage fortifié résultent ainsi pour une large part de la tension entre conception théorique, transformations techniques et réactivation opérationnelle, mais aussi des dynamiques locales et post-conflit que l'analyse détaillée mettra en évidence. Leur lecture dans le relief et les données LiDAR suppose désormais de quitter le cadre théorique général pour entrer dans celui, plus localisé, du terrain d'étude.

CHAPITRE 3 : PRÉSENTATION DU SECTEUR D'ÉTUDE



Côte d'Île-de-France - Carte de la France et des pays voisins (Niox, 1883)

3. PRÉSENTATION DU SECTEUR D'ÉTUDE

Ce chapitre établit le cadre géographique, paysager et historique indispensable à l'analyse morphologique et morphogénétique des fortifications Séré de Rivières du Pays de Reims. Elle vise à restituer l'environnement physique et humain dans lequel les ouvrages s'insèrent, par l'intermédiaire de deux sous-parties dédiées respectivement à la présentation de chacune de ces dimensions.

La première section (3.1) décrit les composantes physiques du territoire, à savoir les contextes géomorphologique, climatique, hydrogéologique, biogéographique et l'occupation actuelle du sol, qui déterminent les ressources locales et surtout la sensibilité du paysage aux processus géomorphologiques qui agissent sur les contrastes de conservation observés dans les données LiDAR.

La section suivante (3.2) propose une approche géohistorique et historique portée tant sur l'évolution de l'occupation du sol depuis le XVIIIe siècle que sur l'histoire militaire de la région, dont le contexte historique, spécifique à la place de Reims, de la création de ces fortifications.

La combinaison de cette double connaissance, géographique et historique, est indispensable à la compréhension des processus anthropiques à l'œuvre qui caractérisent l'événement Anthropocène (Edgeworth, 2023). Elle permet, en outre, d'évaluer la sensibilité des reliefs créés par les sociétés humaines aux processus érosifs et de comprendre les conditions actuelles de visibilité des formes dans les données LiDAR.

3.1. Paramètres géographiques et environnementaux

La ceinture fortifiée de Reims se développe dans un espace de contact de l'est du Bassin parisien, à l'interface entre deux plateaux lithologiquement différents (plateaux des formations cénozoïques et de Champagne crayeuse). Cette position résulte d'une histoire géologique longue (conditions de dépôt paléogènes, dégagement du relief au Quaternaire, héritages périglaciaires) et se traduit par un ensemble éclectique de reliefs et formations géologiques du substratum ou superficielles. À cette trame géomorphologique s'ajoutent des contrôles climatiques et des paramètres hydrologiques, hydrogéologiques et biogéographiques qui structurent le fonctionnement environnemental du secteur.

L'objectif de cette section est de caractériser ces paramètres physiques, en considérant qu'ils conditionnent simultanément l'implantation des ouvrages, leurs modalités de construction

(terrassement, stabilité, drainage, accès aux ressources), et l'évolution postérieure des formes (conservation, effacement, recouvrement végétal). Autrement dit, il s'agit de préciser les facteurs naturels qui gouvernent la lisibilité actuelle des reliefs anthropiques et des polémoformes, ainsi que la variabilité spatiale de leur signature dans l'analyse LiDAR.

La section s'organise autour d'un cheminement progressif à travers ces paramètres de contexte indispensables à l'interprétation des polémoformes observées. Il est effectué pour cela depuis le cadre morphostructural régional (3.1.1) et la diversité des sites fortifiés (3.1.2) jusqu'aux composantes climatique (3.1.3), hydrogéologique (3.1.4) et biogéographique (3.1.5), laquelle constitue par ailleurs l'occasion d'aborder l'occupation du sol structurant le paysage actuel.

3.1.1. Une situation géostratégique de contact et de passage

Situé à l'interface entre Champagne crayeuse et plateaux de formations cénozoïques, le secteur de Reims appartient à l'ensemble morphostructural des cuestas de l'est du Bassin parisien. Cette sous-section pose le cadre régional qui organise la distribution des reliefs (plateaux étagés, fronts et revers de côte, buttes-témoins et avant-buttes, vallées majeures et percées cataclinales), ainsi que les principaux héritages quaternaires qui modulent la lisibilité des formes. Il constitue le contexte nécessaire pour comprendre, dans les sections suivantes, la diversité des sites d'implantation et les contrastes de conservation des reliefs anthropiques observables aujourd'hui.

3.1.1.1. La ceinture fortifiée de Reims dans le système de cuestas du Bassin parisien

Le secteur de Reims se situe au cœur du système Séré de Rivières, face à l'Allemagne, dans l'est du Bassin parisien, espace qui s'étend du Massif vosgien au Massif armoricain, et du Massif central à l'Ardenne et à l'Artois (fig. 3.1). Entre les Vosges et le centre du bassin, l'alternance de couches géologiques dures et tendres se traduit dans le relief par une succession de cuestas d'orientation subméridienne sculptées par érosion différentielle, perçues par les militaires de la fin du XIXe siècle comme « *six crêtes distinctes* » formant des remparts naturels stratégiques[3] (annexe 8). Par cette organisation spatiale, ces cuestas, qui intersectent effectivement les principaux axes d'invasion vers Paris venant de l'Empire allemand, sont utilisées comme assises au dispositif défensif, au même titre que les principaux massifs montagneux délimitant la frontière orientale de la France (fig. 2.12, 3.1 ; *cf.* partie 2.3.2).

[3] Cette valeur défensive sera relativisée dès la fin du siècle par Barré (1899), qui pointe leur discontinuité et la faible élévation de certaines côtes.

La place occupe une position géographique singulière, de contact et de passage, à la jonction de deux bas-plateaux étagés, séparés par la côte d'Île-de-France (fig. 3.2A-B), et s'inscrit à l'interface de plusieurs vastes régions naturelles. D'un côté, la Champagne sèche, ou crayeuse, s'étend au nord et à l'est. De l'autre, le Soissonnais et le Tardenois s'étendent à l'ouest, et le plateau de la Montagne de Reims au sud, lequel, malgré son importance topographique, ne comporte aucun fort (*cf.* parties 3.2.3.1 et 3.2.3.2).

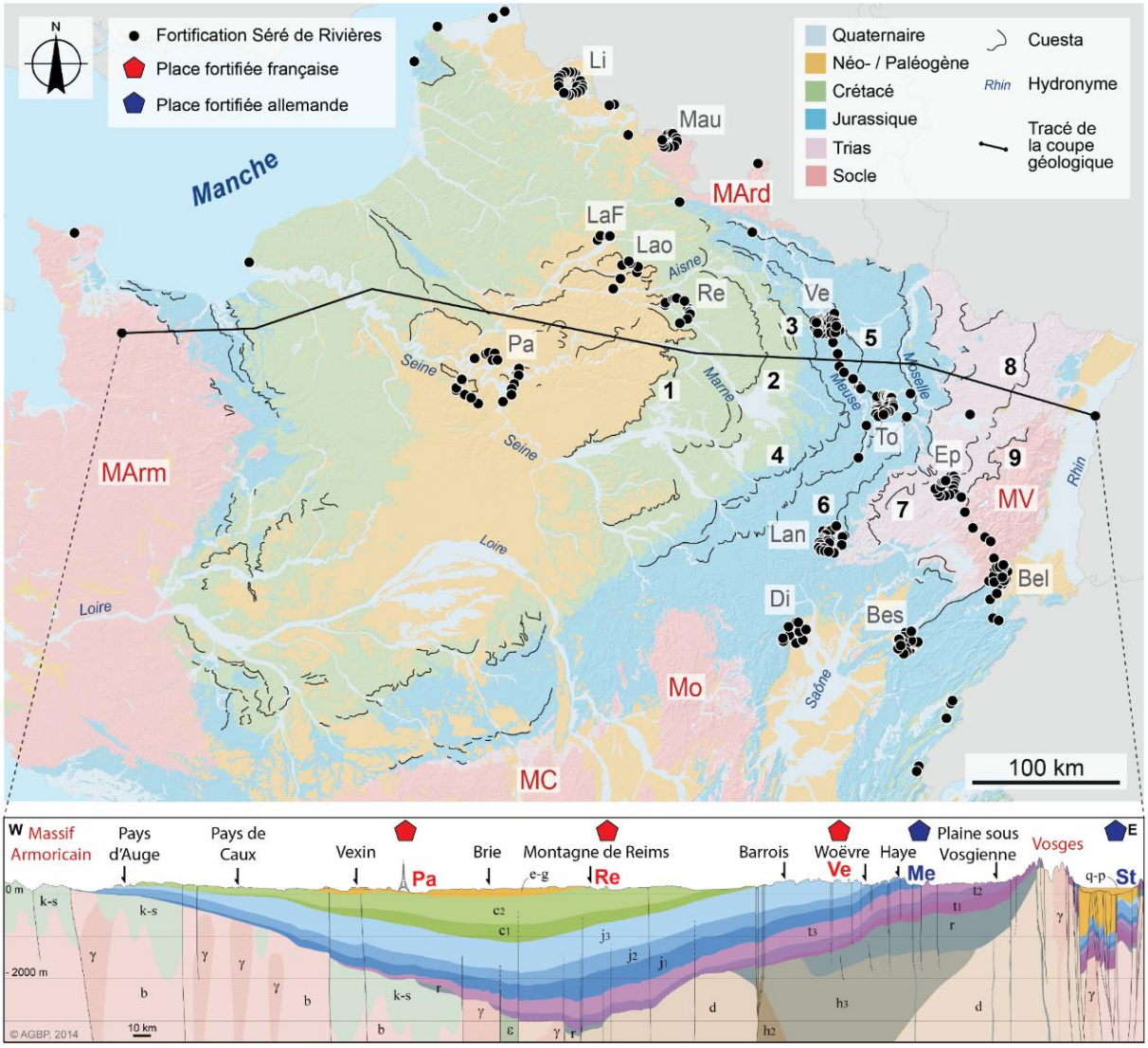


Figure 3.1 : Cœur du dispositif Séré de Rivières et axe d'invasion central par rapport au système de cuestas du Bassin Parisien (carte d'après Dandurand et al., 2022 ; coupe d'après Gély et Hanot, 2014 ; Cuesta d'après Battiau-Queney, 1993). Bel : Belfort ; Bes : Besançon ; Di : Dijon ; Ep : Épinal ; La : Langres ; Lan : Langres ; Lao : Laon ; LaF : La Fère ; Li : Lille ; MArd : Massif ardennais ; MArm : Massif armoricain ; Mau : Maubeuge ; MC : Massif Central ; Me : Metz ; MO : Morvan ; MV : Massif vosgien ; Pa : Paris ; Re : Reims ; St : Strasbourg ; To : Toul ; Ve : Verdun. 1 : Côte d'Île-de-France ; 2 : Côte de Champagne ; 3 : Côte d'Argonne ; 4 : Côte des Bars ; 5 : Côte de Meuse ; 6 : Côte de Meuse 7 : Côte infraliasique ; 8 : Côte de Lorraine ; 9 : Pseudo-côte du Buntsandstein.



Figure 3.2 : Carte géologique simplifiée des substrats du Mésozoïque et du Cénozoïque, dont Quaternaire, du secteur de Reims. a : Réduit de Chenay ; b : Fort de Saint-Thierry ; c : Batterie de Loivre ; d : Fort de Brimont ; e : Batterie du Cran de Brimont ; f : Fort de Fresne ; g : Fort de Witry-lès-Reims ; h : Batterie de Berru ; i : Vigie de Berru ; j : Fort de Nogent-L'Abbesse ; k : Fort de la Pompelle ; l : Fort de Montbré. Ep : Épernay ; Fi : Fismes ; MdBe : Mont de Berru ; MdBr : Mont de Brimont ; MdR : Montagne de Reims ; MdST : Massif de Saint-Thierry ; Re : Reims.

3.1.1.2. La Champagne crayeuse

À l'est et au nord, le plateau de la Champagne sèche, délimité sur sa frange orientale par la cuesta de Champagne, se caractérise par un relief ondulé par de grands versants à faible pente, et un réseau dense de talwegs majoritairement secs, hérités du Quaternaire. Ce plateau crayeux, non seulement ondulé mais aussi incliné vers l'ouest, culmine entre 200 et 80 m d'altitude. Il s'adoucit dans sa partie occidentale, formant la « Plaine de Reims », alors qu'il est plus accidenté à l'est, étant notamment marqué par une plus forte incision et la persistance de reliefs relictuels imposants (« les Monts de Champagne »). Ces croupes longent la crête d'interfluve séparant les bassins-versants de la Suippe et de la Vesle (Devos et al., 2022), où une grande partie des réseaux de défense furent établis pendant la Grande Guerre (Villate, 1925 ; Taborelli, 2018).

Le plateau correspond à l'affleurement des craies blanches de Champagne (fig. 3.2B), témoins d'une sédimentation biodétritique datant du Crétacé supérieur, lorsque la mer de la Craie, peu profonde et calme, recouvrait la région (Laurain et al., 1981). Près de la côte de Champagne à l'est, les couches les plus anciennes datent du Turonien supérieur, suivies du Coniacien, du Santonien et enfin du Campanien, qui affleure à l'ouest, dans le secteur de Reims. Les formations superficielles, discontinues et peu épaisses, se manifestent sous forme de Limons des plateaux et de grèze périglaciaire (« graveluche » ; Allouc et al., 2018) ou sont inféodées au réseau de talwegs hérités (colluvions) ou au tracé du réseau hydrographique (alluvions fluviatiles, anciennes et actuelles).

3.1.1.3. Plateaux cénozoïques

À l'ouest et au sud de Reims, les plateaux de formations cénozoïques correspondent à une structure monoclinale simple (pendage $\approx 1/2^{\circ}$), très légèrement ondulée par quelques anticlinaux et synclinaux peu marqués, s'abaissant vers le centre du bassin de Paris (Gély, 2018) et fracturée par des failles peu cartographiées mais suggérées dans la littérature scientifique (Duprat, 1997). L'évolution paléogéographique du Tertiaire a façonné deux principaux plateaux, constituant le revers de la côte d'Île-de-France et séparés par la petite cuesta du Bartonien (fig. 3.2B).

Au sud de Reims, la Montagne de Reims, promontoire le plus oriental des terrains cénozoïques drapé par les Argiles à Meulières, domine d'une cinquantaine de mètres les plateaux structuraux du Soissonnais et du Laonnois. Sa nature humide et boisée est perçue comme avantageuse pour la défense par le Comité de défense dès le lendemain de la guerre franco-prussienne (Richard, 2009). À l'ouest et au nord-ouest, les plateaux du Soissonnais et du Chemin des Dames dans le Laonnois, armés par les calcaires du Lutétien et coiffés de limons de plateaux (lœss), offrent de bonnes terres agricoles. En constituant la surface

structurale, ainsi que la couche dure sommitale de la cuesta, ce plateau des calcaires lutétiens est l'unité géomorphologique la plus importante des terrains cénozoïques (Laurain, 1986).

3.1.1.4. Côte d'Île-de-France : héritage paléogène et dégagement quaternaire

La géologie très diversifiée de ces terrains entraîne une géographie plus contrastée qu'en Champagne, influençant l'usage des sols et les paramètres géomorphologiques. La sédimentation s'effectue au Paléogène (Thanétien-Rupélien) et se caractérise par une situation de rivage du Thanétien (Laurain et Meyer, 1986) au Lutétien (Gély, 1996, 2009, 2016). Cette situation paléogéographique est marquée par une succession de transgressions et de régressions marines (Duprat, 1997 ; Guillocheau et al., 2000), avec une sédimentation marine à l'ouest du Pays rémois, et littorale le long du tracé de la côte d'Île-de-France (Gély, 1996 ; Devos et al., 2009 ; Gély et al., 2009).

Le dégagement du relief de cuesta y apparaît plus marqué que dans d'autres secteurs du Bassin parisien, probablement en lien avec la faible résistance mécanique du substrat crayeux (Le Roux et Harmand, 1998 ; Cojan et al., 2007). Ce dégagement s'opère principalement lors du creusement des vallées, effectué essentiellement en début de période froide (Antoine, 1993).

L'incision est initialement amplifiée au niveau de larges gouttières sommitales, qui concentrent les écoulements au sein d'un réseau hydrographique étendu, peu encaissé et faiblement hiérarchisé (Lejeune et al., 2002). Dans les secteurs crayeux, où les vallées indigènes drainent des cours d'eau de plus faible puissance spécifique, l'incision demeure plus modérée et le transport des matériaux arrachés est moins efficace. Cette différence de dynamique explique le contraste morphologique observé entre la vallée de la Marne, profondément encaissée, et celle de la Vesle, caractérisée par des versants plus ouverts et des profils moins marqués (Devos, 2010). Malgré cette incision globalement modérée, le développement d'un réseau dense de talwegs quaternaires induit une structuration fine du relief, organisée en un véritable quadrillage topographique à l'échelle des plateaux crayeux.

L'incision du réseau hydrographique dans les formations cénozoïques, bien plus dense et pérenne qu'en Champagne crayeuse, segmente le revers de la côte d'Île-de-France en une succession de plateaux (fig. 3.2B ; Laonnois, Soissonnais, Tardenois, Brie, Montagne de Reims), voire, vers le nord, en crêtes étroites issues d'une dissection avancée, comme au Chemin des Dames. Cette organisation résulte d'une incision quaternaire marquée, associée à une érosion régressive active, qui a profondément entaillé le système de cuestas.

3.1.1.5. Vallées majeures et percées cataclinales : organisation des passages

Les trois grandes vallées, larges de deux à trois kilomètres, creusées par l'Aisne, la Vesle et la Marne, découpent perpendiculairement, en différentes sections, ce relief de cuesta et le

système de bas-plateaux étagés. L'altitude des talwegs varie d'une centaine de mètres dans l'amont champenois jusqu'à une cinquantaine de mètres au sein des plateaux de formations cénozoïques. À la longitude de la côte d'Île-de-France, le dénivelé dépasse les 200 m entre la vallée de la Marne et les interfluves de la Brie et de la Montagne de Reims, où se situe le sommet des plateaux de formations cénozoïques. Le commandement s'abaisse à une centaine de mètres plus au nord, entre les interfluves du Massif de Saint-Thierry, du Soissonnais et du Laonnois et les talwegs de la Vesle et de l'Aisne.

L'orientation générale est-ouest du réseau hydrographique détermine des percées dans la cuesta d'Île-de-France. L'incision des cours d'eau et l'érosion régressive ont en effet engendré des entonnoirs de percées cataclinales, favorisant des points de passage idéaux pour les voies de communication (routes, voies ferrées, canaux de navigation). Dans ce contexte, Reims occupe une position clé, à la fois par sa situation de contact entre plusieurs ensembles géomorphologiques contrastés et par son implantation au débouché de l'entonnoir de percée cataclinale de la Vesle. Ces seuils topographiques ont été très tôt identifiés comme structurants pour les circulations et les contrôles territoriaux, ce qui explique leur prise en compte dans le système Séré de Rivières (*cf.* parties 2.3.2 et 3.2.3).

La cartographie du réseau de talwegs, hiérarchisé selon Strahler (fig. 3.3), met en évidence des positions d'implantation contrastées au sein de la ceinture rémoise. Un seul ouvrage (la Pompelle) se situe au contact immédiat d'un axe de drainage majeur (Vesle, ordre 6), tandis que les ouvrages situés sur la butte de Brimont bordent un vallon secondaire (ordre 4). Les autres forts occupent systématiquement des sites en tête de vallons d'ordre 1, dont l'organisation spatiale est radiale à dendritique divergeant, autour de la petite butte de Montbré, de la butte de Berru mais également dans le Massif de Saint-Thierry (interfluve Vesle-Loivre). Ces différentes positions confirment donc une préférence pour des lignes de crête et des positions de commandement. Au-delà de la seule description, ce cadre topographique fournit une clé de lecture des choix d'implantation et des conditions d'exposition, qui seront ensuite discutées à l'aune de l'histoire de la place et de son organisation défensive (*cf.* partie 3.2.3.2).

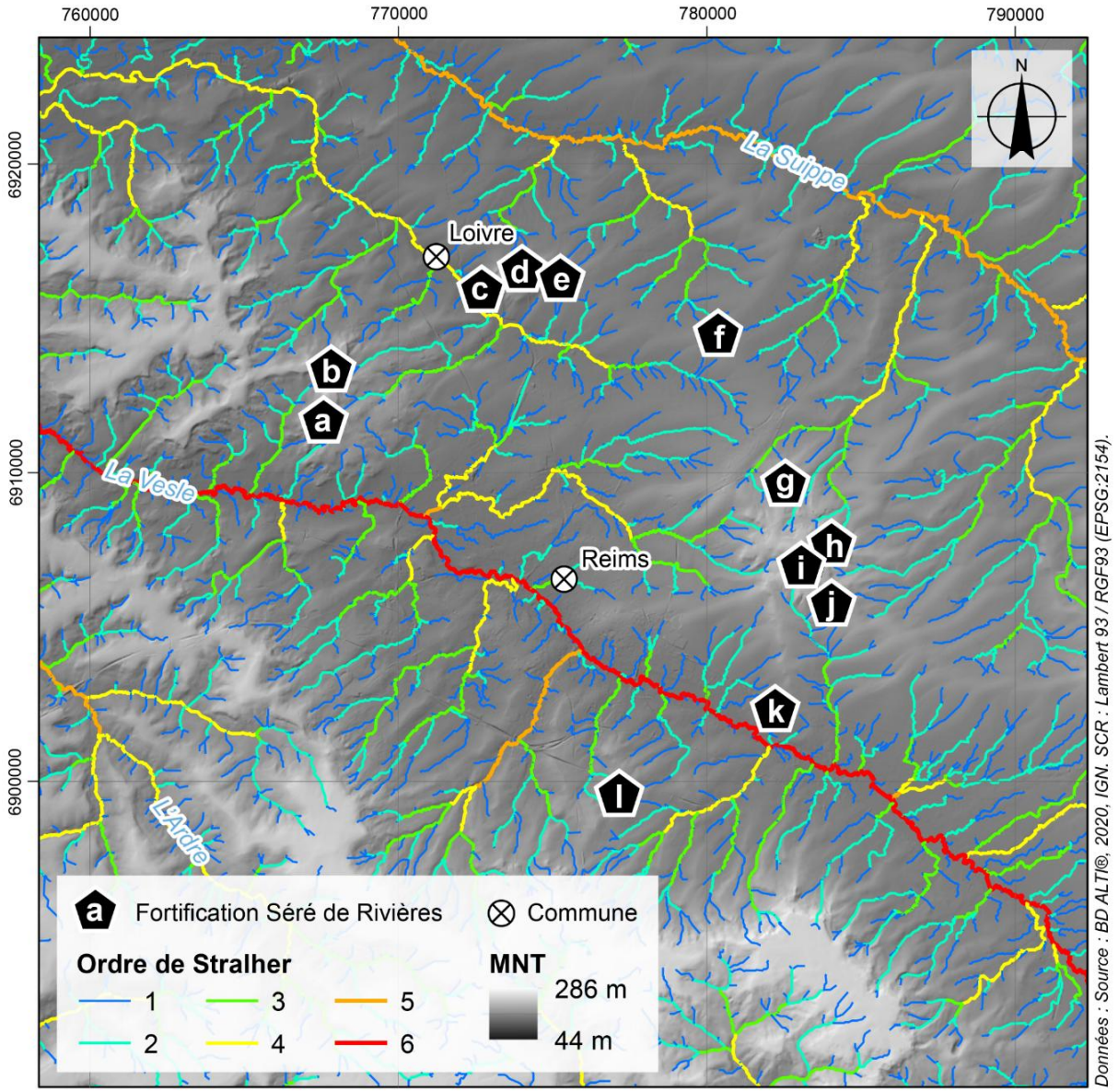


Figure 3.3 : Carte du réseau de talwegs dans le secteur de Reims organisés selon la classification de Strahler. a : Réduit de Chenay ; b : Fort de Saint-Thierry ; c : Batterie de Loivre ; d : Fort de Brimont ; e : Batterie du Cran de Brimont ; f : Fort de Fresne ; g : Fort de Witry-lès-Reims ; h : Batterie de Berru ; i : Vigie de Berru ; j : Fort de Nogent-L'Abbesse ; k : Fort de la Pompelle ; l : Fort de Montbré.

La présentation de ces paramètres géographiques et géomorphologiques montre que la ceinture fortifiée de Reims s'inscrit dans un espace de transition et de passage au sein de l'est du Bassin parisien. Le secteur est caractérisé par une diversité morphostructurale associée aux reliefs de la côte d'Île-de-France (cuesta, buttes-témoins, avant-buttes, bas-plateaux étagés, percée cataclinale) constituant le cadre régional dans lequel s'inscrivent les sites fortifiés. Elle justifie un changement d'échelle, afin d'analyser plus finement la variété des sites géomorphologiques mobilisés par la ceinture fortifiée, qui déterminent les possibilités d'implantation et de contrôle des axes de passage.

3.1.2. Des sites fortifiés diversifiés liés aux conditions de dépôt au Paléogène et au dégagement des reliefs au Quaternaire

La configuration de la ceinture fortifiée répond à la situation de la cité de Reims, inscrite dans un entonnoir de percée cataclinale, au contact de la Champagne et des Pays des formations tertiaires (fig. 3.2B). Elle prend place au sein d'une structure monoclinale de formations paléogènes caractérisée par de fortes variations latérales et verticales de faciès et de puissance, reflétant une alternance de conditions de sédimentation, tantôt marine, tidale, fluvioestuarienne, continentale ou lagunaire (Laurain et al., 1976 ; Laurain et al., 1981 ; Laurain et Meyer, 1986 ; fig. 3.4, 3.5).

Aujourd'hui, les 7 forts et 5 ouvrages secondaires qui composent la ceinture sont implantés sur les reliefs associés à la cuesta d'Île-de-France qui jalonnent la percée (fig. 3.2B, 3.5). Ces derniers se dégagent au Quaternaire, période par ailleurs corrélative au feutrage du relief par le comblement des vallées (alluvions) et l'accumulation de colluvions sur les versants.

Le but de cette section est de présenter la diversité de sites géomorphologiques qui découlent de cette situation, car elle est indispensable pour comprendre l'organisation spatiale des forts. Elle permet également de saisir les paramètres géomorphologiques ayant conditionné la phase de construction de la place fortifiée, puis son évolution jusqu'à aujourd'hui, abordées dans les parties suivantes.

Pour cela, une analyse géologique du secteur est proposée à partir de l'interprétation des notices géologiques des feuilles Reims (Laurain et al., 1981), Fismes (Laurain et al., 1976), Asfeld-la-Ville (Pommerol, 1975) et Avize (Laurain, 1986), ainsi que des travaux de thèse menés par Bollot (2014) et Berthe (2024). Cette analyse s'organise chronostratigraphiquement à travers la présentation des trois grands types de sites géomorphologiques distingués en fonction de leur position structurale.

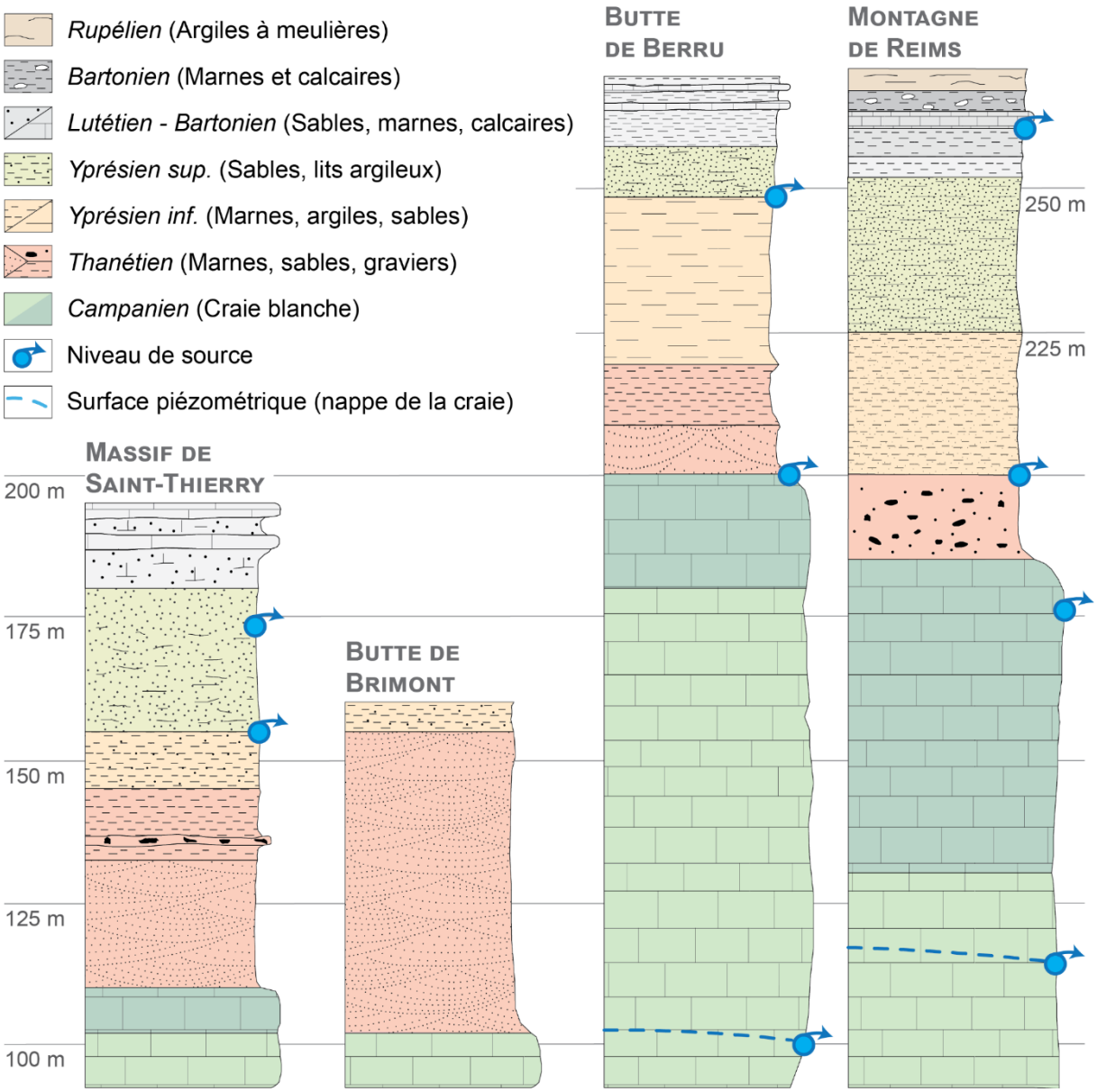


Figure 3.4 : Logs lithostratigraphiques des terrains sédimentaires mésozoïques et cénozoïques de la région de Reims (d'après Laurain et al., 1981 ; d'après Berthe, 2024). A : Massif de Saint-Thierry ; B : Butte de Brimont ; C : Butte de Berru ; D : Montagne de Reims.

3.1.2.1. Avant-buttes sur craie (Campanien)

La *première catégorie* de sites s'apparente aux *avant-buttes sur craie* de Champagne (Campanien inférieur ; *c.* 83,6 à 77 Ma), majoritairement représentée par une craie à *Actinocamax quadratus,* constituant la roche affleurante dominante à la base de la série stratigraphique étudiée (fig. 3.2B, 3.4, 3.5). La craie à *Belemnitella mucronata* et *Magas pumilus* du Campanien supérieur l'accompagne à la base des principaux reliefs mais n'héberge aucun fort. Elles correspondent à une craie blanche très pure et homogène, mais historiquement peu exploitée car friable et gélive (Laurain et al., 1981).

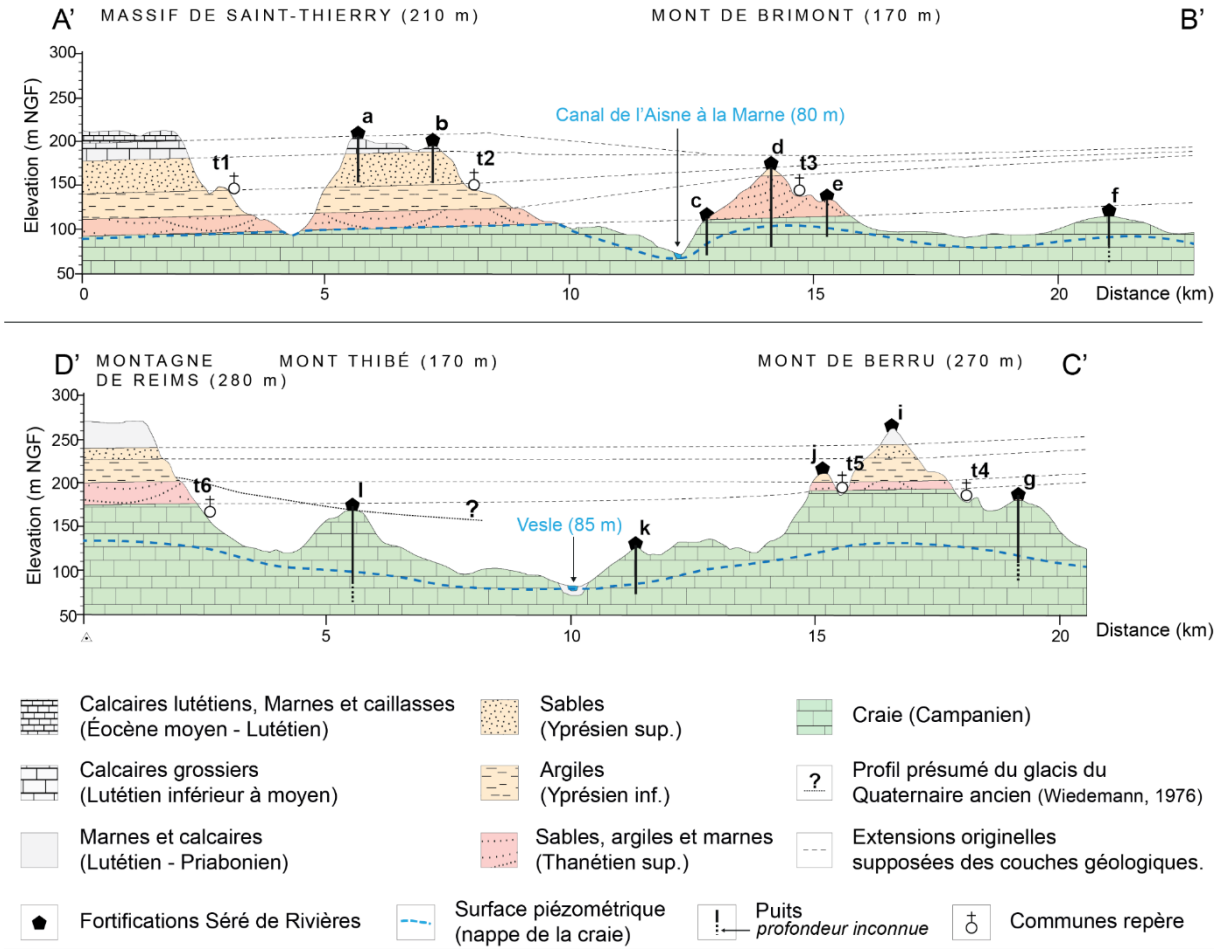


Figure 3.5 : Coupes géologiques des plateaux étagés montrant le rôle d'assise du relief de cuesta dans l'organisation de la ceinture fortifiée de Reims (les tracés sont représentés sur la figure 3.2B). a : Réduit de Chenay ; b : Fort de Saint-Thierry ; c : Batterie de Loivre ; d : Fort de Brimont ; e : Batterie du Cran de Brimont ; f : Fort de Fresne ; g : Fort de Witry-lès-Reims ; h : Batterie de Berru ; i : Vigie de Berru ; j : Fort de Nogent-L'Abbesse ; k : Fort de la Pompelle ; l : Fort de Montbré. t1 : Trigny ; t2 : Pouillon ; t3 : Brimont ; t4 : Berru ; t5 : Nogent-l'Abbesse ; t6 : Rilly-la-Montagne.

Cette craie affleurante est localement recouverte par des formations superficielles issues de la gélifraction quaternaire. Il s'agit en particulier des grèzes crayeuses litées, communément désignées sous le terme de « graveluche » en Champagne, constituées de cryoclastes de craie remaniés et redistribués sur les versants et dans les dépressions peu encaissées (annexe 9A-D).

Ces formations sont complétées, dans les fonds de vallées, par des dépôts alluviaux. Les alluvions anciennes se répartissent en bas niveaux de terrasses (environ 5 à 10 m), associés à des cours d'eau indigènes aux formations crayeuses. Elles sont principalement composées de graviers et de sables crayeux, localement enrichis en limons calcaires par colluvionnement latéral. Les alluvions actuelles et modernes correspondent à des dépôts limoneux généralement d'épaisseur inframétrique, dont l'hydromorphie peut être ponctuellement accentuée par la présence de niveaux tourbeux (Laurain et al., 1981).

Une nette dichotomie longitudinale apparaît entre l'est et l'ouest, avec des affleurements de craie atteignant 190-200 m d'altitude sur les versants de la butte de Berru et des plateaux orientaux de Montagne de Reims, qui s'abaissent à 100 m en contrebas du Massif de Saint-Thierry. Cette distinction s'exprime dans l'altitude des croupes de craies sur lesquelles sont positionnés les trois forts, de part et d'autre du Mont de Berru, concernés par ce type de site : le fort de Fresne à 110 m d'altitude, le fort de la Pompelle à 120 m, surplombant de 40 m la vallée de la Vesle et le fort de Montbré à 170 m.

Les versants réglés du plateau de la Montagne de Reims se raccordent autour de 225 m et dominent une à deux générations de glacis plus bas, dont la plus récente assure le raccordement avec la plaine alluviale de la Vesle (Berthe, 2024). De tels glacis s'observent également en contrebas de la butte de Berru. Ces glacis sont aujourd'hui largement dégradés, souvent disséqués et conservés sous forme de lambeaux discontinus, se traduisant localement par des replats structuraux développés dans la craie, parfois encore coiffés de formations résiduelles thanétiennes.

Des indices topographiques, tels qu'un plan incliné continu entre le plateau de la Montagne de Reims et la vallée de la Vesle, associés à des dépôts détritiques hétérométriques attribuables à des coulées de solifluxion, indiquent que le fort de Montbré est implanté sur les vestiges de l'un de ces anciens glacis de raccordement (fig. 3.5 ; Wiedemann, 1976). Des configurations morphologiques comparables sont observées au niveau des croupes crayeuses de la Pompelle, qui correspondent également à des reliques de glacis.

3.1.2.2. Buttes-témoins

La *deuxième catégorie* comprend les *buttes-témoins*, qui constituent le support des principaux groupes fortifiés de la ceinture de Reims (fig. 3.2B, 3.5).

3.1.2.2.1. Thanétien

Au nord, la butte de Brimont (170 m) se compose presque entièrement des sables grésifiés du Thanétien supérieur, qui reposent généralement sur la surface irrégulière sommitale de la craie, résultant d'une discordance pendant le Paléocène supérieur (Danien-Sélandien ; limite K-T). Le fort de Brimont, occupant la partie sommitale coiffée d'un lambeau d'argiles yprésiennes, est ici renforcé par deux ouvrages complémentaires disposés sur un replat thanétien, à l'est (batterie du Cran de Brimont) et sur la base crayeuse du flanc ouest (*groupe de Brimont* ; Lacroix, 1909).

Les figures 3.6 et 3.7 soulignent la diversité des conditions de dépôt au Thanétien (59,2 à 56 Ma) qui se répercute dans les différents secteurs, révélant une succession de faciès

sédimentaires, marins et littoraux sableux, puis fluviatiles et continentaux à l'épaisseur variable (Laurain et al., 1981 ; Duprat, 1997).

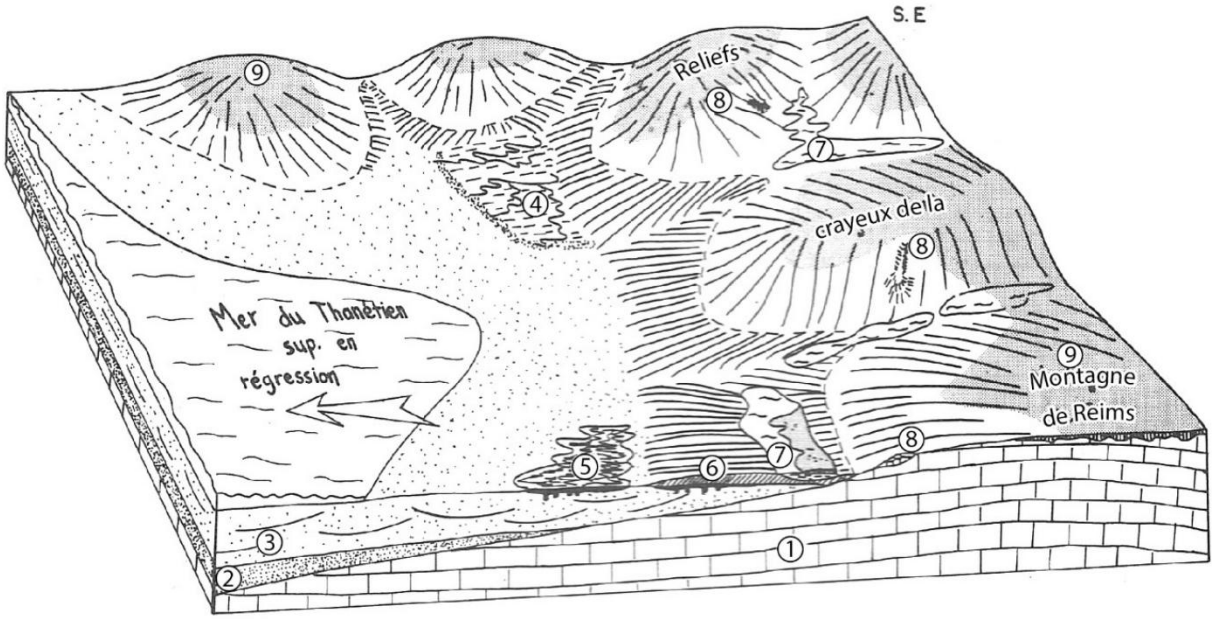


Figure 3.6 : Contexte paléogéographique de la région de Reims au Thanétien (d'après Laurain et Meyer, 1986). 1 : Craie de Reims ; 2 : Tuffeau du Moulin compensé ; 3 : Sables de Châlons-sur-Vesle ; 4 : Conglomérat de Cernay ; 5 : Grès ferrugineux ; 6 : Sables de Châlons-sur-Vesle supérieurs ; 7 : calcaires et Marnes de Rilly, Chenay et Breuil ; 8 : Travertins de Sézanne et Louvois ; 9 : Calcrètes. Les dépôts 2 et 3 sont marins, les dépôts 4 à 6 sont fluvio-marins et les dépôts 7 à 9 sont continentaux.

Le substrat sableux de la butte de Brimont, d'environ 50 m d'épaisseur, est constitué de sables marins littoraux moyens, typiques de l'étage dans la région, notamment illustrés par les Sables de Châlons-sur-Vesle, qui rétrécissent à environ 25 m au Massif de Saint-Thierry (fig. 3.4). Sur la butte-témoin de Berru, les sables se situent à la base du talus oriental, avec une épaisseur diminuant jusqu'à moins de 10 m du fait d'une plus grande proximité au rivage (fig. 3.7).

Sur cette butte, qui culmine à 270 m, les fortifications sont adossées à la plupart des couches géologiques (*groupe de Berru*). La ligne de défense principale commence, au nord, par le fort de Witry-lès-Reims, situé sur un glacis bien conservé formant une large croupe crayeuse, surmontée de sables marneux thanétiens. Elle se poursuit par les ouvrages de Berru (vigie et batterie), situés sur les couches supérieures (*cf. infra*), jusqu'au fort de Nogent-l'Abbesse, implanté 4 km au sud sur une butte isolée par l'incision des sédiments paléocènes, mais restant topographiquement connectée à l'extrémité sud de la butte-témoin (fig. 3.2B, 3.5).

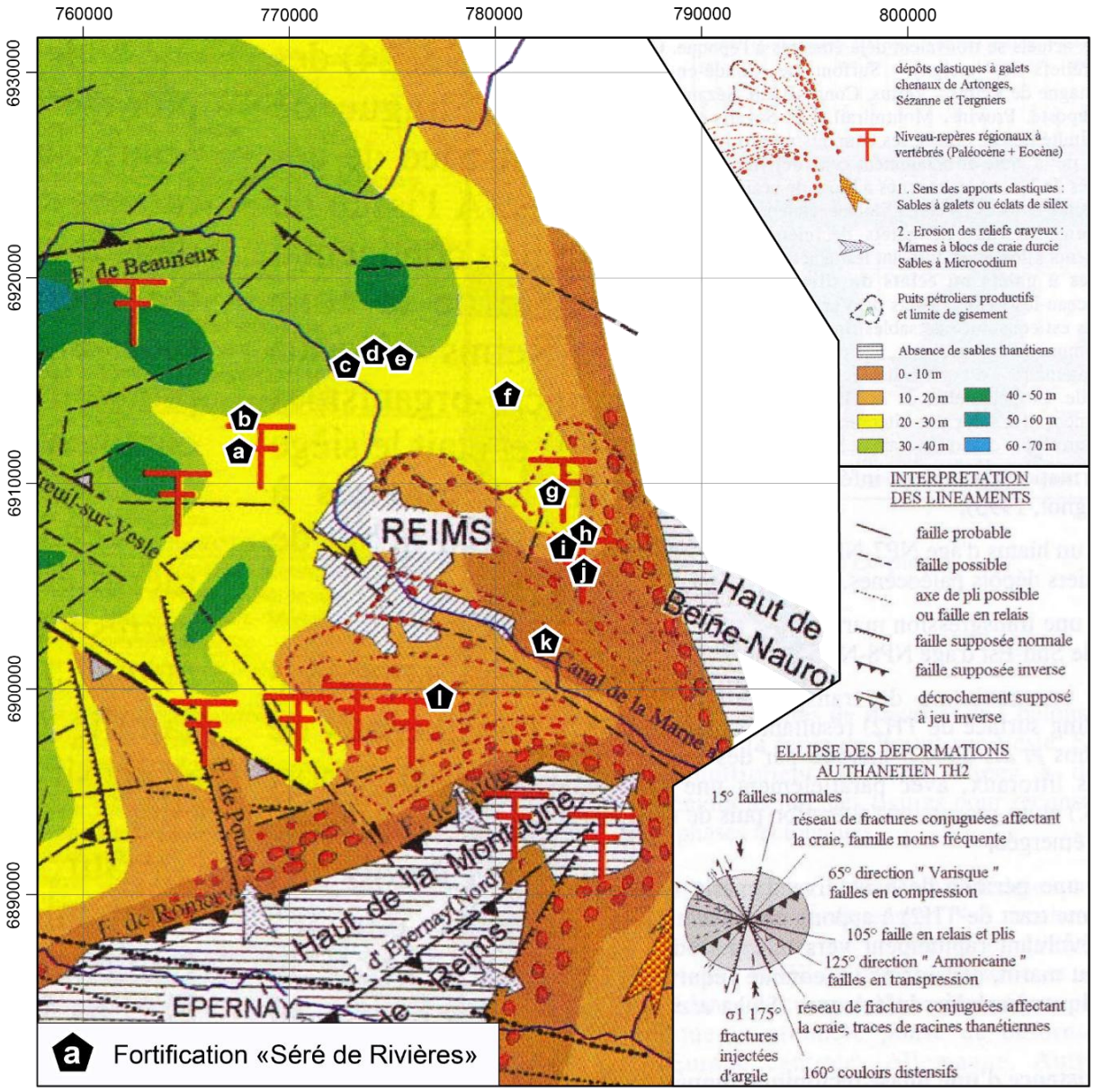


Figure 3.7 : Carte des conditions de dépôts au Thanétien (d'après Duprat, 1997). a : Réduit de Chenay ; b : Fort de Saint-Thierry ; c : Batterie de Loivre ; d : Fort de Brimont ; e : Batterie du Cran de Brimont ; f : Fort de Fresne ; g : Fort de Witry-lès-Reims ; h : Batterie de Berru ; i : Vigie de Berru ; j : Fort de Nogent-L'Abbesse ; k : Fort de la Pompelle ; l : Fort de Montbré.

La base de cette petite butte est constituée d'argiles et de marnes continentales thanétiennes, absentes de la butte de Brimont. Ces formations présentent des faciès fluviaux et dulçaquicoles, localement ravinants, entaillant les sables sous-jacents sous forme de sables et graviers siliceux et calcaires attribués au Conglomérat de Cernay, ainsi que les Marnes de Chenay. Elles sont localement surmontées par des sables marins thanétiens lesquels, selon les secteurs, reposent soit directement sur le toit de la craie, soit sur les formations continentales sous-jacentes, et intègrent ponctuellement des niveaux de galets résiduels (Durlet J.-M., 2024).

Ces différences de sédimentation durant le Thanétien sont notamment liées à l'existence d'un cône de déjection d'un paléo-fleuve, caractérisé par des dépôts clastiques à galets, au droit de la partie orientale de la Montagne de Reims et de la butte de Berru (fig. 3.7 ; Duprat, 1997 ; Lejeune et Devos, 2001). En Montagne de Reims, la formation de calcarénites à Microcodium qui en résulte favorise une activité endokarstique et la présence d'un liseré de formes exokarstiques en bordure du plateau, jouant un rôle clé dans la karstogenèse de la craie (Berthe et al., 2021 ; Berthe et al., 2022). En revanche, sur le Mont de Berru, l'activité karstique est plus limitée en raison d'un petit bassin-versant, et les traces exokarstiques sont ténues, susceptibles d'être confondues aux entonnoirs d'obus, ce qui peut compliquer leur détection sur le LiDAR.

Sur le Massif de Saint-Thierry, la sédimentation fluviatile thanétienne induit par ailleurs la présence des Marnes de Chenay qui sont également intercalées au sein de chenaux creusés dans les sables marins et représentées sur plus d'une dizaine de mètres, accompagnés des Grès du Mont Chenois et de rares calcaires continentaux à *Chara* et Limnées (fig. 3.6 ; Laurain et al., 1976).

3.1.2.2.2. Yprésien

La majeure partie de la butte de Berru est constituée de formations de l'Yprésien (56 à 47,8 Ma ; fig. 3.5), étage basal de l'Éocène, reposant directement sur le Thanétien supérieur à faciès dulçaquicoles. L'Yprésien est classiquement subdivisé en deux faciès : le Sparnacien (Yprésien inférieur), correspondant à une sédimentation continentale très hétérogène, dominée par des dépôts argileux palustres et fluviatiles liés à une forte instabilité des chenaux, et le Cuisien (Yprésien supérieur), marqué par une sédimentation marine (Laurain et al., 1981).

Le faciès sparnacien est presque exclusivement argilo-marneux sur le Massif de Saint-Thierry *(c.* 20 m de puissance), et marneux au sommet de la butte de Brimont et sur la butte de Berru (Pommerol et al., 1975 ; Laurain et al., 1981). Sur cette dernière, la batterie de Berru se situe plus précisément dans des marnes, argiles et sables ligniteux, qui se transforment au sud du relief en marnes bruns-jaunes. Elles sont surmontées de marnes grises à passées lie-de-vin, reposant directement sur le Thanétien plus au nord. De fait, le sommet de la butte de Nogent-l'Abbesse est effectivement constitué de telles marnes violacées et de sables observés sur le terrain (Durlet J.-M., 2024). La faible perméabilité des formations argilo-marneuses sparnaciennes est corrélative à la présence de zones humides (marais, étangs), favorisant une végétation typique (*e.g.*, *carex*, joncs, roseaux, presles ; Laurain, 1986), souvent inventoriée et/ou protégée (*e.g.*, ZNIEFF type I des Marais du Mont de Berru ; *cf.* partie 3.1.5). Ces formations constituent également un

aquiclude/aquitard d'une nappe perchée (aquifère de l'Yprésien, *cf.* partie 3.1.4), déterminant l'existence d'une ligne de sources.

Le faciès cuisien se manifeste, quant à lui, par des sables marins relativement homogènes sur la bordure du plateau tertiaire et la butte de Berru. Ces sables, probablement déposés dans un contexte estuarien ou fluviatile, sont fins à très fins, et varient du blanc verdâtre au roux lorsqu'ils sont altérés (« Sables de Cuise » ; Laurain et al., 1981). Seul un magasin-caverne creusé en contrebas de la vigie de Berru en 1892 (modernisation post-1885 ; *cf.* partie 2.5.2) a été implanté dans cette couche, laquelle joue par ailleurs un rôle important dans la gestion de l'alimentation en eau (*cf.* partie 3.1.4). En arrière de la ligne défensive formée par les forts de Nogent-l'Abbesse et Witry-lès-Reims et la batterie de Berru, la vigie repose sur des lambeaux sommitaux de dépôts continentaux éocènes supérieurs (Lutétien-Bartonien), principalement marneux et difficiles à différencier. Certaines marnes vertes sont attribuées au Lutétien supérieur continental, tandis que quelques calcaires et marnes beiges, plus rares, pourraient être bartoniennes (Laurain et al., 1981).

3.1.2.3 Revers de côte (Lutétien)

La *troisième catégorie* géomorphologique correspond aux *sites de revers de côte* (fig. 3.5). À l'ouest, au sein du Massif de Saint-Thierry, elle comprend le réduit de Chenay, implanté vers 200 m d'altitude en position de haut de versant au débouché de l'entonnoir de percée cataclinale de la Vesle, ainsi que, 1,5 km plus au nord, le fort principal de Saint-Thierry, culminant à environ 190 m (*groupe fortifié de Saint-Thierry*). Ces deux ouvrages sont établis sur le revers calcaire de la côte d'Île-de-France (Lutétien moyen), formant un interfluve kilométrique qui sépare le vallon de Trigny des vallées de la Loivre et de la Vesle.

Pendant le Lutétien inférieur et le début du Lutétien moyen (*c.* 47,8 à 45 Ma), la région de Reims se situe entièrement sur le continent, avec des dépôts se concentrant en aval de l'entonnoir de percée cataclinale de la Vesle (fig. 3.8A-B). Le Massif de Saint-Thierry n'est ainsi partiellement concerné par une sédimentation littorale, avec un faciès de sables glauconieux typiquement transgressif, qu'à partir de la phase de dépôt des calcaires à Ditrupa (fig. 3.8C ; Bollot, 2014). Il est atteint par la transgression lutétienne durant la phase des calcaires à « Cérithes géants », prenant la forme de faluns coquilliers déposés en condition de hauts-fonds (*i.e.*, à faible profondeur ; fig. 3.8D). Ce mince interfluve matérialise aujourd'hui la limite orientale des calcaires lutétiens. Il comporte donc les seuls affleurements de Lutétien marin du secteur d'étude (fig. 3.2B, 3.4, 3.5), correspondant notamment à des calcaires grossiers présentant une alternance de bancs calcaires décimétriques et d'inter-bancs calcaréo-sableux plus tendres (Laurain, 1986).

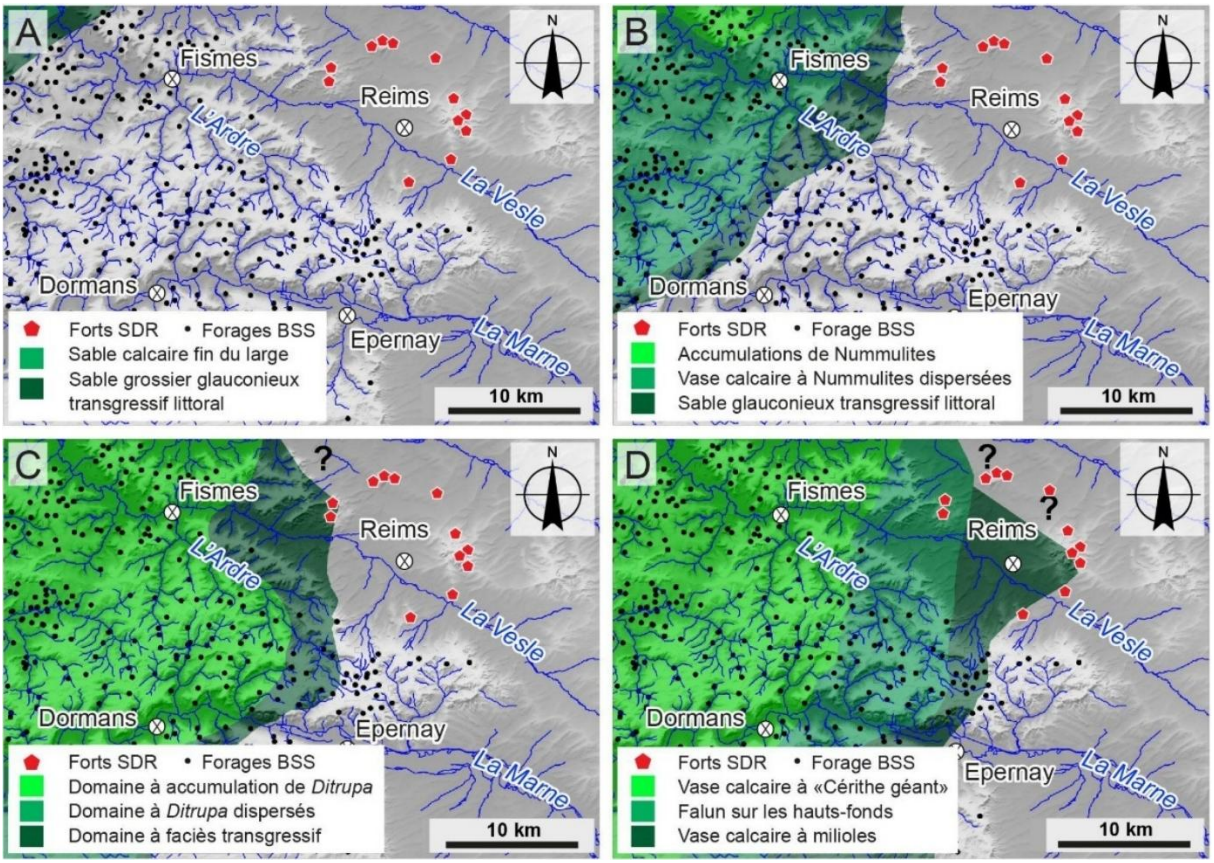


Figure 3.8 : Évolution paléogéographique des dépôts lutétiens du secteur de Reims (d'après Bollot, 2014 inspiré de Gély, 2009). A : Extension des dépôts au Lutétien inférieur ; B, C, D : Succession des dépôts pendant le Lutétien moyen. SDR : Séré de Rivières.

La série sédimentaire régionale se termine en Montagne de Reims par les deux derniers étages de l'Éocène (Bartonien, 41,2 à 37,7 Ma ; Priabonien, 37,7 à 33,9 Ma ; fig. 3.2B, 3.4, 3.5) et le Rupélien (Oligocène inférieur ; 33,9 à 27,8 Ma). Le Bartonien et le Priabonien sont caractérisés par une succession de bancs calcaires décimétriques, avec des interbancs tantôt marneux et tantôt calcaires (Laurain et al., 1981 ; Berthe, 2024). Les Argiles à Meulière sannoisiennes (Rupélien inférieur ; annexe 10) constituent la couche sommitale de la Montagne de Reims et confèrent localement à la côte d'Île-de-France le caractère d'une fausse cuesta (couche tendre sommitale). Elles correspondent à une formation plurimétrique hétérogène, composée de blocs siliceux inclus dans une matrice argilo-sableuse ocre-rouge, issue de processus d'altération en climat tempéré, en lien avec une activité karstique ancienne (Laurain et al., 1981 ; Thiry, 2007). Les niveaux siliceux sont des blocs d'épaisseur inframétrique et de diamètre plurimétrique, d'abord massifs et très compacts évoquant du silex, puis beaucoup plus poreux et vacuolaire lui attribuant un aspect « caverneux » ou « celluleux » tendant à rapetissir vers la surface (Ménillet, 1985 ; Thiry, 2007).

Ce substrat tertiaire est localement masqué par des formations superficielles quaternaires, liées aux dynamiques périglaciaires (fig. 3.2B). Lors des périodes froides, en plus du transfert

et du dépôt de matériaux à grande distance dans les plaines et les terrasses alluviales, les conditions climatiques favorisent la mise en place d'une couverture lœssique continue ou discontinue sur les plateaux (Laurain et al., 1981). Ces Limons des plateaux, formations meubles limono-argileuses de teinte jaune à brun-rouge, résultent de la déflation éolienne de matériaux fins préexistants dans un contexte périglaciaire (Bordes, 1954).

Ils recouvrent préférentiellement les plateaux des formations tertiaires, notamment les Argiles à Meulière de la Montagne de Reims, où ils forment des limons acides d'épaisseur pluridécimétrique. Ils sont en revanche absents du Massif de Saint-Thierry et plus ponctuels sur le plateau crayeux, où leurs épaisseurs peuvent toutefois dépasser 5 m sous forme de limons calcaires. Ces dépôts s'organisent fréquemment en épandages longilignes entre la côte d'Île-de-France et les principales vallées, en particulier entre le versant septentrional de la Montagne de Reims et la Vesle, entre la butte de Berru et la Suippe, ainsi qu'entre la butte de Brimont et la Suippe, où les accumulations sont les plus développées (fig. 3.2B ; Laurain et al., 1981).

Finalement, l'ensemble des formations superficielles quaternaires, bien que secondaires par rapport à l'architecture structurale héritée du Paléogène, contribue à moduler localement la lisibilité des reliefs sur lesquelles s'inscrivent les ouvrages fortifiés.

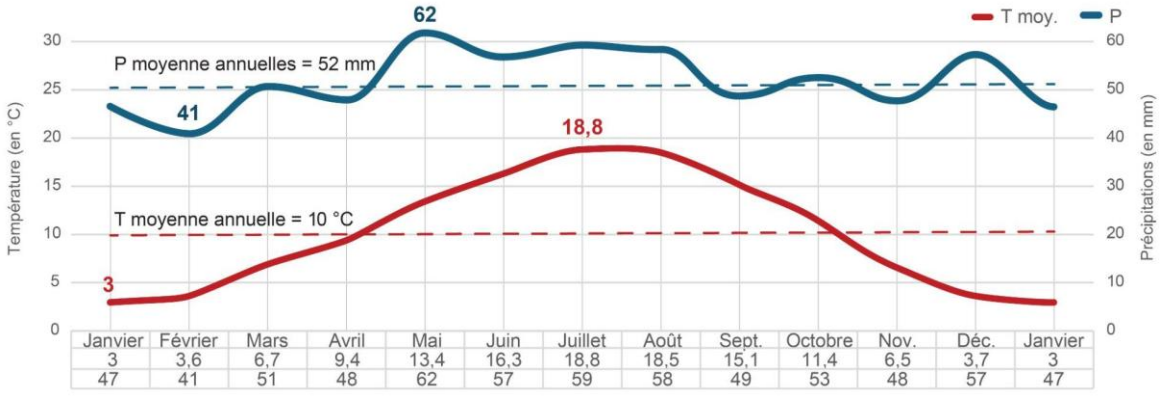
Cette analyse montre que la ceinture fortifiée de Reims repose sur une juxtaposition de sites géomorphologiques contrastés, associant des avant-buttes crayeuses (Campanien), des buttes-témoins de formations tertiaires (Thanétien-Éocène) et des secteurs de revers de côte armés par les calcaires lutétiens. Cette organisation résulte des conditions de sédimentation paléogènes, caractérisées par de fortes variations latérales de faciès et de puissance, combinées au dégagement quaternaire des reliefs.

Ces contrastes structuraux induisent des différences marquées de substrat, de position topographique et de couverture superficielle, qui conditionnent à la fois l'accès aux ressources géologiques et hydriques, les propriétés géotechniques des sites et les modalités d'implantation des ouvrages. Ils influencent également les trajectoires d'évolution des formes, depuis leur mise en place jusqu'à leur état de conservation actuel. Enfin, ce cadre géomorphologique constitue le socle physique sur lequel s'exercent les contrôles climatiques, hydrogéologiques et biogéographiques. Leur prise en compte est également indispensable pour comprendre la variabilité spatiale des polémoformes et leur lisibilité actuelle, et fait l'objet des sections suivantes.

3.1.3. Un climat océanique dégradé structurant les processus naturels

Cette section vise à caractériser le cadre climatique régional comme un paramètre de fonctionnement général du secteur d'étude, et non comme un facteur discriminant direct entre les sites fortifiés. Le climat conditionne le régime des précipitations, la recharge des aquifères, la dynamique des écoulements de surface, les dynamiques géomorphologiques ainsi que les conditions édaphiques et biogéographiques. Il influence également, de manière indirecte, la mise en œuvre, le fonctionnement et la durabilité des aménagements anthropiques, en particulier dans le cas d'ouvrages fortifiés construits sur des points hauts, soumis à des contraintes hydromécaniques et environnementales fortes.

Le diagramme ombrothermique de la station de Reims indique une température moyenne annuelle d'environ 10°C et une amplitude thermique de 16 °C, typiques de la zone tempérée (fig. 3.9). Il caractérise surtout une saisonnalité thermique sans saisonnalité pluviale. En effet, les précipitations, relativement bien réparties au cours de l'année, totalisent environ 675 mm, avec des cumuls mensuels compris entre 41 et 62 mm. Ce régime s'inscrit dans le « *climat océanique dégradé des plaines du centre et du nord de la France* » (type 3 de Joly et al. (2010) ; normale 1971-2000), et dans la classification de Köppen-Geiger comme océanique à été tempéré (type Cfb ; Kottek et al., 2006). Les gradients pluviométriques observés dans l'est de la France (Devos, 1996) et sur la Montagne de Reims (Berthe, 2024) suggèrent l'existence de petits dômes pluviométriques au-dessus des buttes de Brimont et de Berru, avec un surplus de 50 à 100 mm de précipitations annuelles par rapport à Reims (750-800 mm), ce qui n'est pas négligeable dans le bilan de l'eau pour les forts de Reims. Les lames d'eau écoulées correspondant aux pluies efficaces avoisinent effectivement 150 mm dans le secteur.



Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Octobre	Nov.	Déc.	Janvier
3	3,6	6,7	9,4	13,4	16,3	18,8	18,5	15,1	11,4	6,5	3,7	3
47	41	51	48	62	57	59	58	49	53	48	57	47

Figure 3.9 : Diagramme ombrothermique de la station de Reims de la normale 1991-2021 (source : https://fr.climate-data.org/europe/france/champagne-ardenne/reims-337/).

À l'échelle historique, le climat régional s'inscrit dans les grandes fluctuations postglaciaires de l'Europe occidentale, alternant périodes relativement tièdes et phases plus froides. Le Petit Âge Glaciaire (PAG), qui s'étend approximativement du XIIIe au XIXe siècle, se

traduit par des températures moyennes légèrement inférieures à celles du XXe siècle, de l'ordre de quelques dixièmes de degré (Le Roy Ladurie, 2020). Les reconstitutions climatiques disponibles pour Paris (Le Roy Ladurie et al., 2011 ; Javelle et al., 2016) permettent d'extrapoler des tendances comparables pour le Pays rémois, compte tenu de la proximité géographique (*c.* 130 km) et du contexte bioclimatique similaire (fig. 3.10A-B). Le XIXe siècle apparaît globalement plus frais et légèrement moins humide que le XXe siècle, avec une alternance de quatre séquences tièdes et trois séquences fraîches bien marquées.

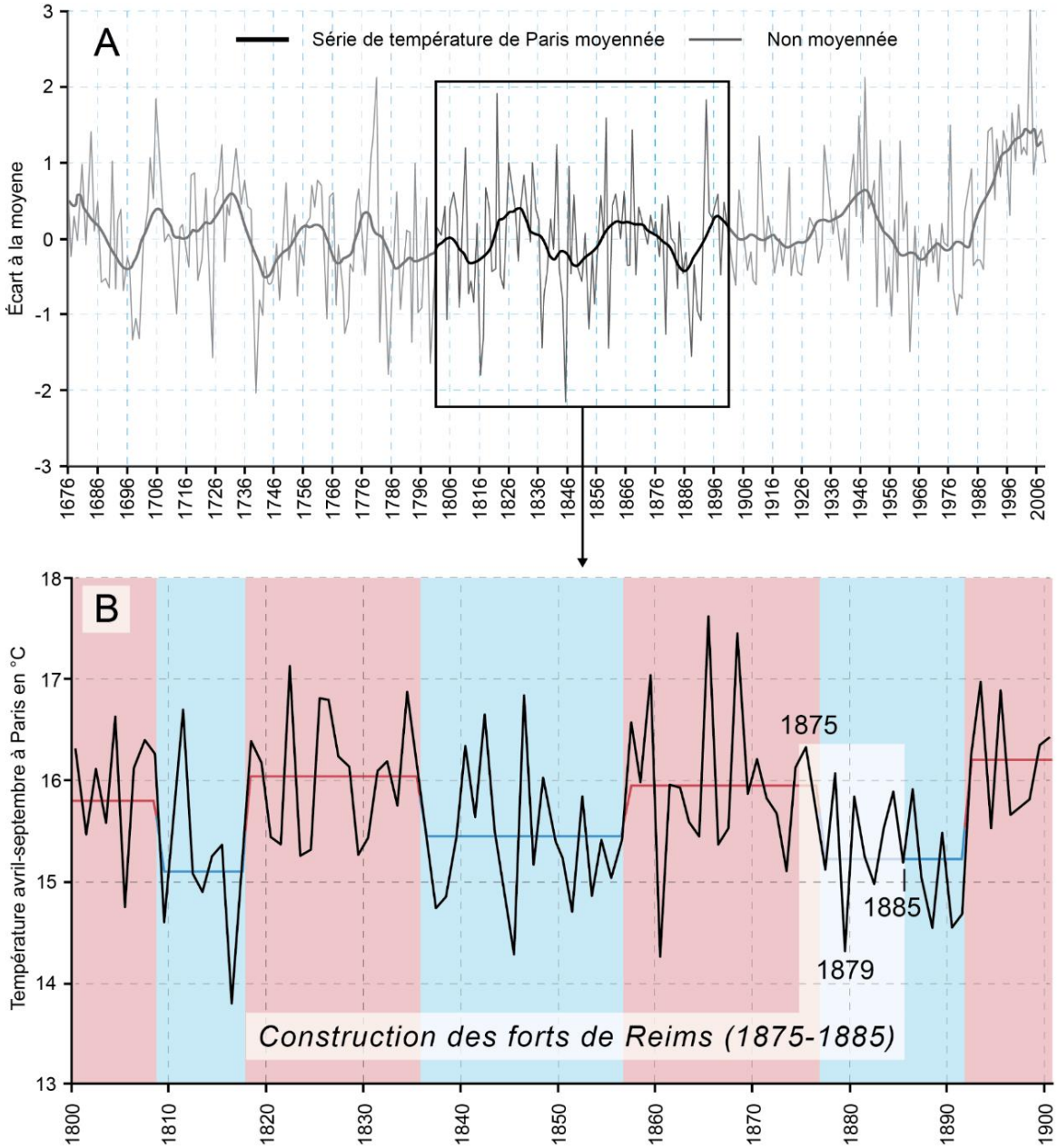


Figure 3.10 : Fluctuations des températures moyennes d'avril à septembre (moyenne glissante sur 11 ans) par rapport à la moyenne du XIXe siècle. A : Période 1676-2006 (d'après Rousseau, 2009) ; B : période 1800-1900 (d'après Javelle et al., 2016 et Le Roy Ladurie et al., 2011).

La période de construction des forts Séré de Rivières autour de Reims s'inscrit précisément dans cette phase de transition climatique, entre la fin d'une séquence relativement clémente (1857-1876) et une phase plus fraîche à partir de la fin des années 1870. Plusieurs hivers rigoureux sont documentés à la fin du XIXe siècle, notamment celui de 1870-1871, suivi d'un minimum thermique marqué en 1879, année au cours de laquelle les températures moyennes figurent parmi les plus basses depuis le XVIIIe siècle (T moy = 8,8 °C). Les précipitations enregistrées sur cette période sont également inférieures de 50 à 200 mm par rapport à la moyenne 1821-1992 de la région d'Épernay (fig. 3.11).

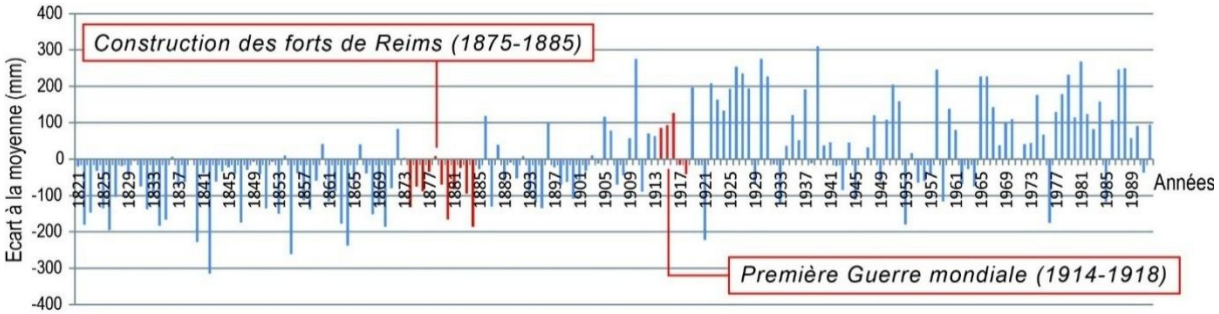


Figure 3.11 : Écart à la moyenne des précipitations totales annuelles sur la période 1821-1992 de la station d'Épernay (d'après Taborelli, 2018).

Ces conditions climatiques exercent une contrainte directe sur les phases de chantier et sur le fonctionnement ultérieur des ouvrages. Les alternances de gel et de dégel, les épisodes pluvieux prolongés et les phases plus sèches conditionnent la stabilité des terrassements, la portance des sols et le comportement hydromécanique des géomatériaux mobilisés. Elles influencent la mise en œuvre des remblais et des couvertures, le séchage et la prise des mortiers, ainsi que l'extraction, le transport et le stockage des matériaux, notamment dans des contextes où les voies de communication peuvent devenir temporairement impraticables.

À l'échelle du fonctionnement des forts, le régime pluvial impose une gestion rigoureuse des eaux météoriques, tant pour l'alimentation en eau (*cf.* partie 3.1.4) que pour la protection des structures contre l'humidité (magasins à poudre) et les infiltrations, en particulier dans les contextes argileux sensibles aux phénomènes de retrait-gonflement ou sur les talus soumis à l'aléa gravitaire, tel qu'au fort de Nogent-l'Abbesse. Les précipitations modérées mais continues sans saison sèche peuvent aussi assurer une alimentation en eau avec un dispositif de récupération des eaux météoriques.

Le dimensionnement des dispositifs de collecte et de filtration repose alors sur des paramètres climatiques contraignants simples, au premier rang desquels la hauteur moyenne annuelle des précipitations, l'intensité maximale des pluies horaires et la valeur des épisodes pluvieux extrêmes (Houdaille, 1889). Dans l'est de la France, ces paramètres impliquent des volumes potentiellement élevés à gérer à l'échelle du petit cycle de l'eau des structures,

notamment via les surfaces de couverture, conditionnant le débit des conduites ou les volumes de stockage nécessaires. Afin d'adapter ces dispositifs aux conditions locales réelles, les ingénieurs militaires recommandent le recours à des observations *in situ*, notamment par l'installation de pluviomètres dédiés sur site, comme le pluviomètre à cadran mis en place à la Vigie de Berru (annexe 11).

Aujourd'hui, le secteur rémois demeure inscrit dans un climat tempéré océanique dégradé, dont les grands traits restent comparables à ceux observés au cours des décennies récentes. Toutefois, après une séquence relativement fraîche entre les années 1950 et 1970, les XXe et XXIe siècles sont marqués par une augmentation rapide et inédite des températures, en France comme à l'échelle globale, principalement imputée aux émissions anthropiques de gaz à effet de serre. Le réchauffement atteint environ +1 °C à la fin des années 2010 par rapport à l'ère préindustrielle (IPCC, 2023).

En définitive, le climat constitue un cadre de fonctionnement commun à l'ensemble de la ceinture fortifiée de Reims. Il n'explique pas à lui seul les contrastes morphologiques observés entre les ouvrages, mais agit de manière diffuse en conditionnant les dynamiques hydrogéologiques et biogéographiques, ainsi que les processus d'effacement ou de conservation des reliefs anthropiques. À ce titre, il fournit une toile de fond indispensable pour l'analyse, dans les sections suivantes, de la disponibilité de la ressource en eau et des trajectoires écologiques associées aux fortifications et à leurs héritages paysagers.

3.1.4. Contexte hydrogéologique

L'accès à une ressource en eau fiable constitue une contrainte fonctionnelle majeure pour les fortifications permanentes, en particulier dans le cadre d'ouvrages conçus pour soutenir des sièges prolongés. Dans le système Séré de Rivières, cette question est d'autant plus centrale que les forts sont majoritairement implantés en position dominante, souvent éloignés des cours d'eau pérennes et des zones de captage traditionnelles. La disponibilité en eau dépend alors étroitement des caractéristiques hydrogéologiques locales.

Cette section analyse donc, dans un premier temps, les caractéristiques hydrogéologiques des aquifères mobilisables par les forts de la ceinture de Reims (structure, profondeur, mode de fonctionnement, *etc.*) et leurs implications opérationnelles en termes d'approvisionnement en eau. Elle examine ensuite les modalités d'approvisionnement mises en œuvre (puits profonds, collecte des eaux météoriques, dispositifs de stockage et de drainage) susceptibles de produire des formes anthropiques spécifiques détectables au LiDAR.

En raison de la position dominante des forts et de la faible densité du réseau hydrographique de surface, l'hydrologie n'apparaît pas comme un facteur structurant de la

morphologie des sites étudiés, ce qui justifie qu'elle ne soit abordée ici qu'à titre de contexte général.

3.1.4.1. Un cadre hydrogéologique contraignant pour des ouvrages implantés en position dominante

Le secteur de la ceinture fortifiée de Reims s'inscrit dans un contexte hydrogéologique contrasté, dominé par deux grands ensembles aquifères, dont le fonctionnement conditionne fortement l'accès à la ressource en eau : l'aquifère de la craie champenoise et les aquifères multicouches associés aux formations éocènes des plateaux occidentaux. Les paramètres de ces réservoirs interagissent étroitement avec la topographie, plaçant les forts implantés sur les interfluves dans des situations hydrogéologiques souvent défavorables (fig. 3.5, 3.12).

3.1.4.1.1. Aquifère et nappe de la craie

L'aquifère de la craie champenoise, développé dans les craies séno-turoniennes, constitue l'un des principaux réservoirs d'eau souterraine du Bassin parisien et l'un des plus importants en Europe (West et al., 2023). Il se caractérise par une porosité totale élevée mais une porosité efficace plus limitée, liée à la prédominance d'une microporosité matricielle, complétée par un réseau de fissures d'origine tectonique, géomorphologique ou karstique localisée, notamment au voisinage de la limite Crétacé-Paléogène (Laurain et al., 1981). La nappe associée fonctionne majoritairement en régime libre, tout en devenant localement captive à l'ouest sous les formations éocènes.

C'est une nappe de dépression qui affleure en fond de vallée. En effet, la surface piézométrique de la nappe de la craie est étroitement inféodée au relief (fig. 3.5, fig. 3.12). Les croupes crayeuses et les buttes témoins déterminent des dômes piézométriques à partir desquels les lignes de courant divergent vers les vallées drainantes. Sur ces hauteurs, l'épaisseur de la zone non saturée est maximale, ce qui implique la nécessité de puits d'importante profondeur pour atteindre la nappe mais de bonnes conditions pour le creusement d'ouvrages souterrains.

Son fonctionnement hydrodynamique est marqué par une forte diffusivité et une réponse rapide aux précipitations efficaces, traduite par des fluctuations piézométriques saisonnières nettes, avec une recharge principalement hivernale et une vidange progressive au cours du reste de l'année (fig. 3.13).

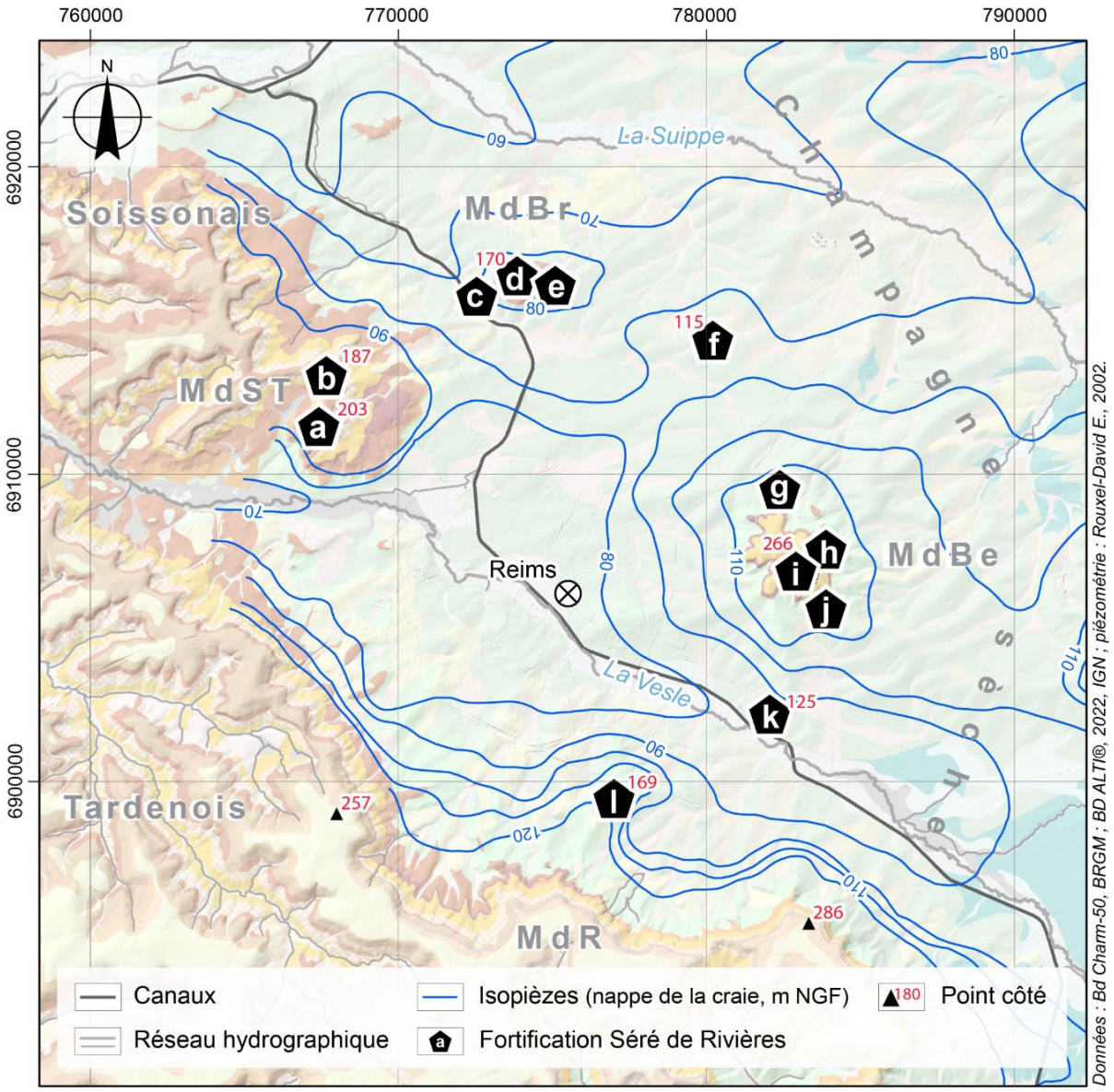


Figure 3.12 : Carte piézométrique de la nappe de la craie en basses eaux (d'après Rouxel-David et al., 2002). a : Réduit de Chenay ; b : Fort de Saint-Thierry ; c : Batterie de Loivre ; d : Fort de Brimont ; e : Batterie du Cran de Brimont ; f : Fort de Fresne ; g : Fort de Witry-lès-Reims ; h : Batterie de Berru ; i : Vigie de Berru ; j : Fort de Nogent-L'Abbesse ; k : Fort de la Pompelle ; l : Fort de Montbré. MdBe : Mont de Berru ; MdBr : Mont de Brimont ; MdST : Massif de Saint-Thierry ; Autres : Secteurs des forts de Fresne, Montbré et la Pompelle.

Ces fluctuations sont plus marquées sur les interfluves, où l'épaisseur de la zone non saturée est maximale, avec des battements piézométriques annuels de l'ordre de 15 à 20 m. Cette configuration impose le creusement de puits incomplets, n'atteignant pas la base de l'aquifère mais de grande profondeur, afin de garantir un accès à la ressource tout au long de l'année, notamment en période d'étiage. Toutefois, la moindre fracturation de la craie sur les interfluves limite la productivité en eau par rapport aux fonds de vallée. À l'inverse, dans les fonds de vallée, la zone saturée est sub-affleurante et les battements piézométriques restent faibles, limités à quelques décimètres (fig. 3.13). L'accès à la ressource y est facilité

par des puits incomplets de faible profondeur, généralement productifs, mais potentiellement plus vulnérables aux contaminations lors des épisodes de crue débordante.

Pour les forts implantés sur les avant-buttes directement inscrites dans la craie (Pompelle, Montbré, Fresne, Witry-lès-Reims), l'approvisionnement en eau peut ainsi être assuré par des puits incomplets de grande profondeur, tandis que pour les ouvrages établis sur des buttes-témoins coiffées de formations paléocènes (Mont de Berru), l'accès à la nappe crayeuse est plus contraint du fait d'une profondeur accrue.

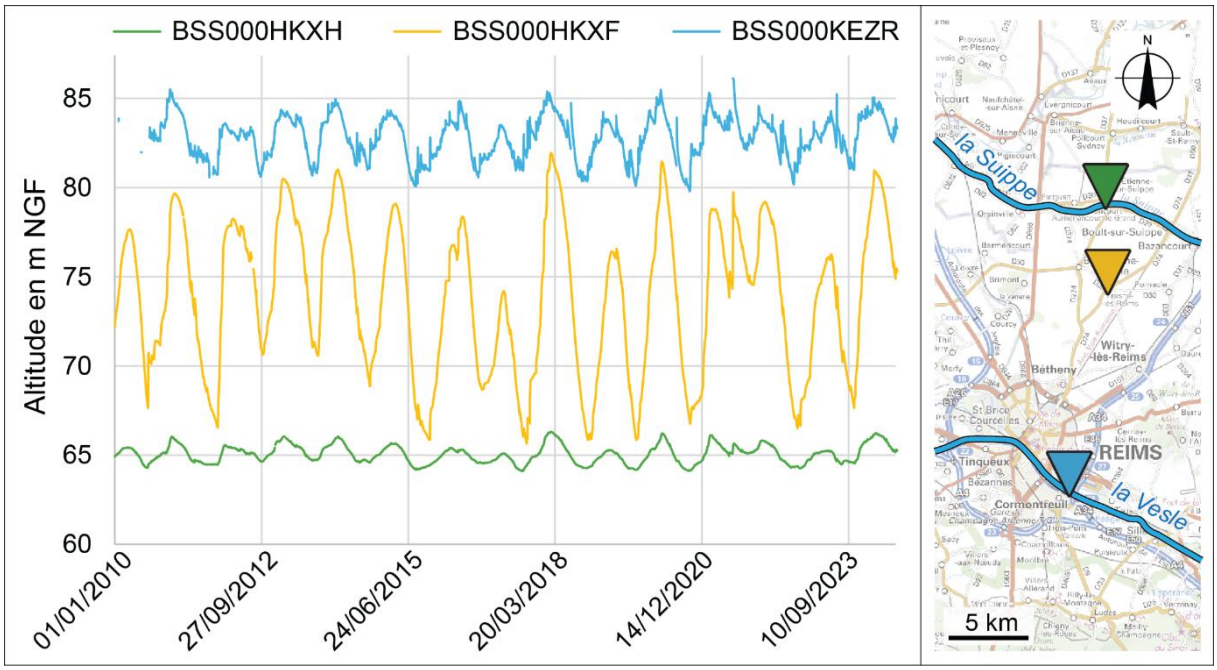


Figure 3.13 : Suivi piézométrique de la nappe de la craie au niveau de la Vesle à Reims (BSS000KEZR), de la Suippe à St-Étienne-sur-Suippe (BSS000HKXH) et de leur interfluve à Fresne-lès-Reims (BSS000HKXF) du 01/01/2012 au 07/08/2024 (données : ADES, SCAN 100 IGN).

Dans le secteur de Reims, les eaux de la nappe de la craie présentent naturellement une bonne qualité, avec une minéralisation modérée à élevée (conductivité moyenne de 564 $\mu S \cdot cm^{-1}$, Cao, 2020) et un faciès bicarbonaté calcique. Toutefois, la nappe à surface libre demeure vulnérable aux contaminations d'origine superficielle, notamment agricoles (nitrates) ou liées aux usages militaires (perchlorates).

3.1.4.1.2. Aquifère et nappe de l'Éocène

À l'ouest du secteur d'étude, les formations tertiaires abritent le système aquifère multicouche de l'Éocène moyen et inférieur, associant calcaires lutétiens, sables yprésiens et niveaux marno-argileux jouant le rôle d'aquitard (Yprésien, faciès Sparnacien). L'épaisseur et le fonctionnement de ces aquifères varient fortement selon les secteurs, avec des épaisseurs de l'ordre de 10 m pour le Lutétien dans le Massif de Saint-Thierry, mais pouvant atteindre 40 à 50 m sous le Parisis ou le Soissonnais. La nappe est généralement

perchée et libre dans le nord du Bassin parisien, mais devient localement captive sous les Marnes et caillasses du Lutétien supérieur, contribuant à une forte hétérogénéité spatiale des ressources accessibles (Manlay et Parmentier, 2023).

La forte incision du réseau hydrographique entraîne un rabattement piézométrique marqué de ces nappes perchées, la surface piézométrique étant fréquemment abaissée jusqu'au mur de l'aquifère. Dans ces conditions, ces réservoirs demeurent globalement peu productifs et particulièrement vulnérables aux pollutions d'origine superficielle.

La multiplicité verticale des nappes génère des lignes de sources étagées le long des versants (fig. 3.4). Ces sources, souvent perchées, ne correspondent pas à des émergences de dépression comme dans le cas de la craie, mais à des sources de trop-plein ou de déversement contrôlées par la structure et la stratigraphie. Bien que leur productivité soit généralement modeste, elles peuvent constituer des ressources localement mobilisables par captage gravitaire, notamment pour des établissements ruraux situés à proximité immédiate des versants. Ce type d'alimentation, trop vulnérable en cas de siège, n'est pas utilisé pour les ouvrages militaires, lesquels sont par ailleurs placés sur les points les plus hauts. L'accès à la ressource est assuré par le creusement de puits traversant plusieurs formations géologiques, ce qui impose la mise en place d'un cuvelage afin d'éviter toute contamination du captage.

Mais les eaux des formations tertiaires ne sont pas systématiquement potables, compte tenu de leur vulnérabilité aux pollutions de surface et de leurs faciès hydrochimiques très diversifiés, essentiellement bicarbonatés calciques, souvent saturés dans le Lutétien (tufières de source ; Devos et al., 2009), voire sulfatés-calciques à ferreux dans l'Yprésien, riche en pyrite dont l'oxydation produit des sulfates.

Ainsi, la combinaison d'une position topographique dominante, d'une zone non saturée épaisse dans la craie, et d'aquifères tertiaires discontinus et fortement drainés définit un cadre hydrogéologique globalement contraignant pour les forts de la ceinture de Reims. Ce contexte explique la diversité des solutions techniques mises en œuvre pour assurer l'alimentation en eau des ouvrages, qui font l'objet d'une analyse spécifique dans la section suivante.

3.1.4.2. Stratégies d'alimentation en eau des forts de la ceinture de Reims

L'accès à une ressource en eau autonome constitue un enjeu central dans la conception des forts du système Séré de Rivières, conçus pour résister à des sièges de plusieurs mois. Les prescriptions de 1874 fixent des besoins minimaux de l'ordre de 5 l/jour/homme et 12 l/jour/cheval en temps de guerre. À cela s'ajoutent les usages techniques (refroidissement des bouches à feu, entretien des installations, puis, plus tardivement, groupes électrogènes ;

Truttmann, 2017) qui incitent le Génie à provisionner pour chaque ouvrage environ 10 l/jour/homme, tel que cela se traduit sur les documents d'époque dans le rapport entre la taille de la garnison et les besoins déterminés pour 6 mois (tab. 3.1). Dans ce contexte, l'alimentation en eau repose sur des solutions locales, adaptées aux contraintes hydrogéologiques propres à chaque site.

L'analyse menée par Houdaille (1889) sur la ceinture fortifiée de Reims met en évidence une forte hétérogénéité des modalités d'accès à l'eau, directement liée à la position topographique des ouvrages et à la nature des formations géologiques sous-jacentes (fig. 3.5 ; tab. 3.1). Trois grands modes d'alimentation peuvent être distingués : le captage de la nappe de la craie par puits profonds, l'exploitation des nappes perchées tertiaires, et la collecte des eaux météoriques, qui peuvent être combinés au sein de dispositifs hybrides.

Fort	Captage principal	Débit (/jr)	Profondeur	Capt. sec. att.	Citernes	Garnison	Besoins (6 mois)
a	1 puits	1,5 m³	50 m	oui	nd	138	250 m³
b	4 puits	1,5 m³	50 m	non	nd	497	895 m³
c	1 puits	1,5 m³	50 m	non	nd	150	270 m³
d	3 puits	1,5 m³	90 m	non	665 m³	729	1 460 m³
e	1 puits	1,5 m³	50 m	non	nd	98	180 m³
f	1 puits	nd	≥ 50 m	non	nd	nd	nd
g	1 puits	6 m³	≥ 50 m	oui	nd	377	680 m³
h	Source Rouby	/	/	non	314 m³	295	530 m³
i	Source Rouby	/	/	non	nd	100	200 m³
j	Inconnu	/	/	non	800 m³	421	765 m³
k	1 puits	nd	50 m	non	nd	277	500 m³
l	1 puits	3 m³	≥ 50 m	oui	nd	313	565 m³

Nappe de la craie — Nappe des sables yprésiens — Eaux météoriques

Tableau 3.1 : Récapitulatif des stratégies d'alimentation en eau des forts de Reims (Capt. sec. att. : captage secondaire attesté). a : Réduit de Chenay ; b : Fort de Saint-Thierry ; c : Batterie de Loivre ; d : Fort de Brimont ; e : Batterie du Cran de Brimont ; f : Fort de Fresne ; g : Fort de Witry-lès-Reims ; h : Batterie de Berru ; i : Vigie de Berru ; j : Fort de Nogent-L'Abbesse ; k : Fort de la Pompelle ; l : Fort de Montbré.

3.1.4.2.1. Captage de la nappe de la craie par puits profonds

Le premier mode d'alimentation correspond au captage de la nappe de la craie par puits profond, qui concerne les forts implantés sur les croupes et avant-buttes crayeuses (Fresne, La Pompelle, Montbré) ou adossées aux buttes-témoins (fort de Brimont et de Witry-lès-Reims, batteries du Cran de Brimont et de Loivre).

Dans ces configurations, la nappe est généralement libre, volumineuse et pérenne, mais faiblement productive en raison de son éloignement des fonds de vallée, où la fracturation de la craie est plus développée. Les débits exploitables restent modestes, de l'ordre de 1,5 m³/j (tab. 3.1). À l'échelle de la ceinture, la valeur maximale observée atteint néanmoins jusqu'à 6 m³/j au fort de Witry-lès-Reims, ce qui demeure faible au regard des aquifères de

vallée, et s'accompagne d'une profondeur de captage importante liée à la position topographique élevée des ouvrages (Houdaille, 1889).

L'épaisseur de la zone non saturée impose en effet le creusement de puits atteignant 45 à plus de 90 m de profondeur au fort de Brimont, du fait de la traversée préalable des formations sableuses thanétiennes avant d'atteindre la craie. Ce site présente ainsi une épaisseur maximale de zone non saturée, qui limite les débits mobilisables et rend les captages sensibles aux fluctuations piézométriques saisonnières (fig. 3.13).

3.1.4.2.2. Exploitation des nappes perchées tertiaires

Le deuxième mode d'alimentation, qui implique un contexte hydrogéologique distinct, concerne le captage des nappes perchées dans les formations yprésiennes, au sein des aquifères multicouches de l'Éocène. Il concerne, à l'ouest de la ceinture, sur le Massif de Saint-Thierry, les forts de Saint-Thierry et le réduit de Chenay. Ces deux ouvrages exploitent principalement la nappe contenue dans les sables cuisiens par les formations argilo-marneuses sparnaciennes, jouant ici le rôle d'aquitard, par l'intermédiaire de puits d'une profondeur de l'ordre de 40 à 50 m (tab. 3.1 ; fig. 3.14).

Ces nappes, de faible puissance et spatialement discontinues, sont en outre drainées par l'incision du réseau hydrographique, favorisant l'apparition de sources étagées en pied de versant ou le long des lignes structurales, et, par conséquent, le développement de zones humides sur les versants (*cf.* partie 3.1.5). Cette superposition d'aquifères impose également un cuvelage des puits, afin de stabiliser les formations meubles traversées (sables, argiles), de cibler l'aquifère recherché et aussi de limiter les mélanges d'eaux susceptibles d'altérer la qualité de la ressource.

Au fort de Saint-Thierry, implanté sur les calcaires lutétiens à 188 m d'altitude, l'aquifère capté correspond aux sables de l'Yprésien supérieur (Cuisien). Il est intercepté par un puits complet de 36 m de profondeur, atteignant les argiles de l'Yprésien inférieur (Sparnacien) à 152 m NGF, et intégralement cuvelé au-dessus du niveau piézométrique moyen (fig. 3.14). L'eau est remontée par un bélier hydraulique.

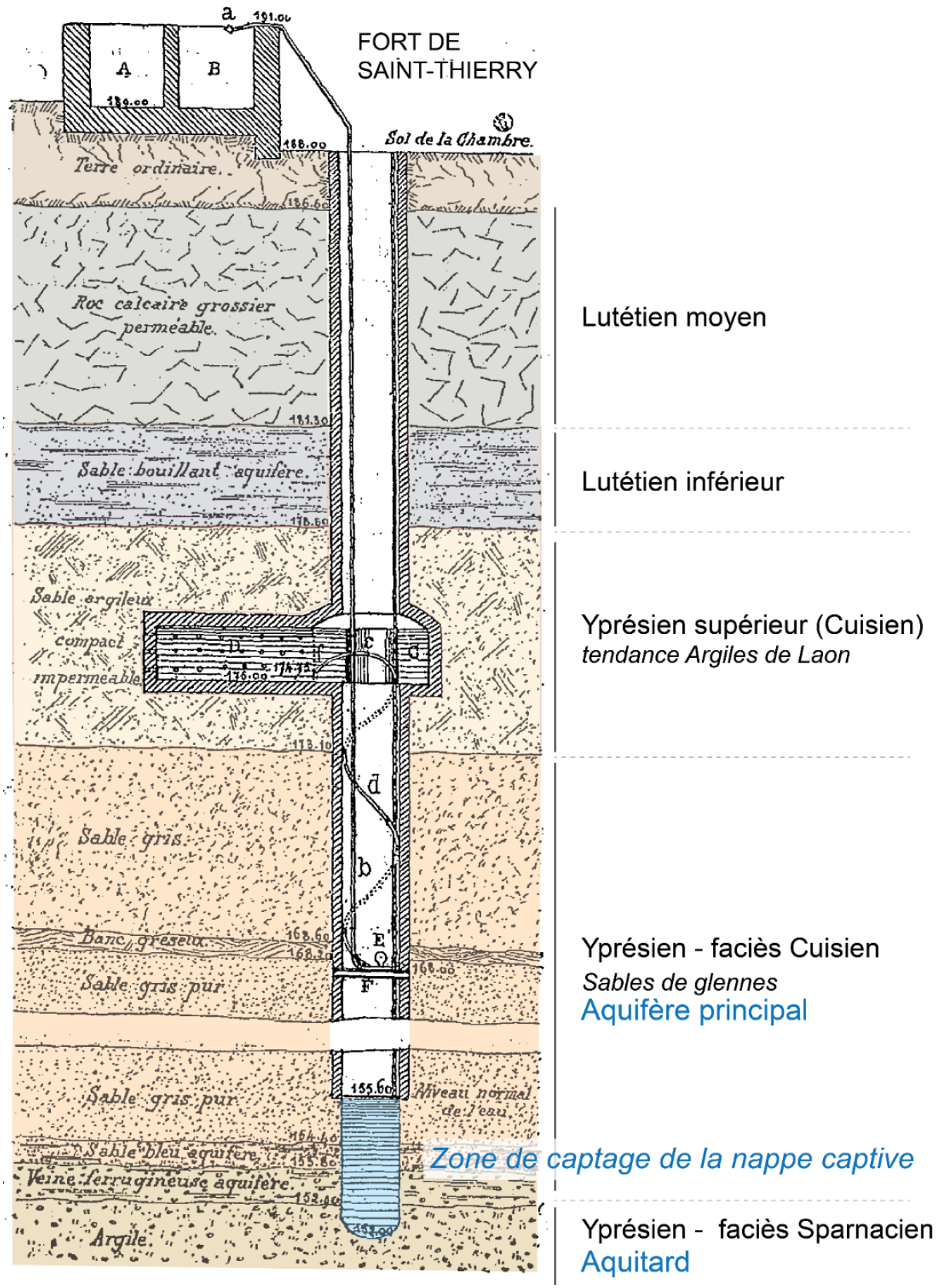


Figure 3.14 : Coupe géologique relative à l'installation d'un bélier hydraulique dans un des puits du fort de Saint-Thierry (d'après Houdaille, 1889).

3.1.4.2.3. Absence de puits et recours à des ressources alternatives

Le troisième mode d'alimentation principal concerne les ouvrages ne disposant pas de puits exploitant directement une nappe, qui sont par ailleurs situés au droit d'une zone saturée et d'une couverture géologique particulièrement épaisses : fort de Nogent-l'Abbesse, vigie et batterie de Berru. Houdaille (1889) signale explicitement les difficultés rencontrées dans le secteur de la butte de Berru, liées à la décomposition des pyrites présentes dans les formations yprésiennes, qui dégrade fortement la qualité chimique des eaux souterraines.

Dans ce contexte, l'alimentation repose sur des solutions alternatives de collecte des eaux météoriques clairement identifiées sur ces deux derniers ouvrages, notamment via l'utilisation de sources artificielles aménagées, comme la source Rouby. Ce dispositif artificiel de captage et de filtration des eaux de pluie, portant le nom de l'ingénieur-entrepreneur qui en est le promoteur et le diffuseur (Jules Rouby), est aménagé en surface sur une zone argileuse imperméabilisée et drainée vers une citerne située dans l'ouvrage fortifié (annexe 12A-B). Il se présente sous la forme d'un entonnoir enterré de lames d'argiles pilonnées dont l'impluvium est constitué par une surface engazonnée surmontant des niveaux à granulométrie contrastés (cailloux, sables), jouant le rôle de filtres, et enfin d'un réservoir maçonné alimentant une citerne de stockage.

Le fort de Nogent-l'Abbesse demeure le cas de plus incertain de la ceinture fortifiée car, bien qu'aucun puits ne soit implanté à la construction du fort, aucune documentation ne caractérise précisément la présence de pyrites ou ne mentionne un système de captage artificiel quelconque.

3.1.4.2.4. Dispositifs complémentaires et systèmes hybrides

Quel que soit le mode principal d'alimentation, Houdaille (1889) insiste sur le rôle systématique des dispositifs complémentaires, en particulier la récupération des eaux de pluie à partir de surfaces de couvertures en tuile combinées à des filtres, tel que cela est attesté au réduit de Chenay, ainsi qu'aux forts de Montbré et de Witry-lès-Reims. Ces dispositifs, susceptibles de produire des morphologies observables en surface, permettent de sécuriser l'approvisionnement en assurant une certaine redondance en cas de défaillance des captages principaux.

Dans ce petit cycle de l'eau, intégrant captage, stockage, adduction et assainissement, les citernes assurent la fonction de réservoir avant la distribution vers les points d'usage des forts (latrines, cuisines). Le contexte géomorphologique des sommets d'interfluves, caractérisé par une zone non saturée épaisse développée dans des roches perméables (craie, calcaires lutétiens fissurés), confère par ailleurs aux sites de bonnes capacités d'évacuation des effluents par infiltration, via des puits filtrants (puisards).

Ainsi, l'analyse du cadre hydrogéologique local fait ressortir plusieurs contraintes influençant les modalités d'alimentation en eau des forts de Reims, que sont notamment la profondeur des nappes, combinée à la position topographique élevée des forts, et la qualité physico-chimique des eaux disponibles (*e.g.*, décomposition des pyrites). Cela induit l'existence de stratégies d'alimentation hétérogènes, potentiellement morphogènes à l'échelle de la ceinture fortifiée, traduisant une adaptation avec le recours à des systèmes fonctionnant généralement de manière hybride qui assurent une alimentation en toute circonstance. Après avoir abordé l'influence des paramètres géomorphologiques, climatiques et hydrogéologiques, la section suivante complète le portrait physique du Pays rémois en présentant le territoire sous la dimension de l'occupation du sol, et notamment des caractéristiques biogéographiques.

3.1.5. Contexte biogéographique, occupation du sol et matrices paysagères

L'objectif de cette section est de présenter les contextes paysagers régionaux et locaux des forts de la ceinture de Reims, au prisme de l'occupation du sol qui conditionne l'acquisition LiDAR, le degré de conservation des polémoformes (Taborelli, 2018) mais aussi témoigne des différentes trajectoires des ouvrages fortifiés analysées plus tardivement (*cf.* partie 6.1).

3.1.5.1. Un cadre biogéographique de transition contrôlé par le relief et la géologie

Le secteur de la ceinture fortifiée de Reims s'inscrit dans une zone de transition biogéographique marquée, paraphrasant les caractéristiques géomorphologiques et géologiques présentées précédemment (*cf.* parties 3.1.1 et 3.1.2). Il est situé à l'interface de deux districts phytogéographiques compris dans deux domaines bioclimatiques distincts, répondant par ailleurs à des Pays différents (fig. 3.15 ; Bournérias et al., 2001) : le district du NE de l'Île-de-France (A ; domaine atlantico-européen) et le district de la Champagne crayeuse (B1 ; domaine médio-européen). Cette position de contact confère au territoire une variabilité écologique élevée par la juxtaposition de contextes environnementaux contrastés, associés à des espèces végétales subatlantiques, submontagnardes et subméditerranéennes.

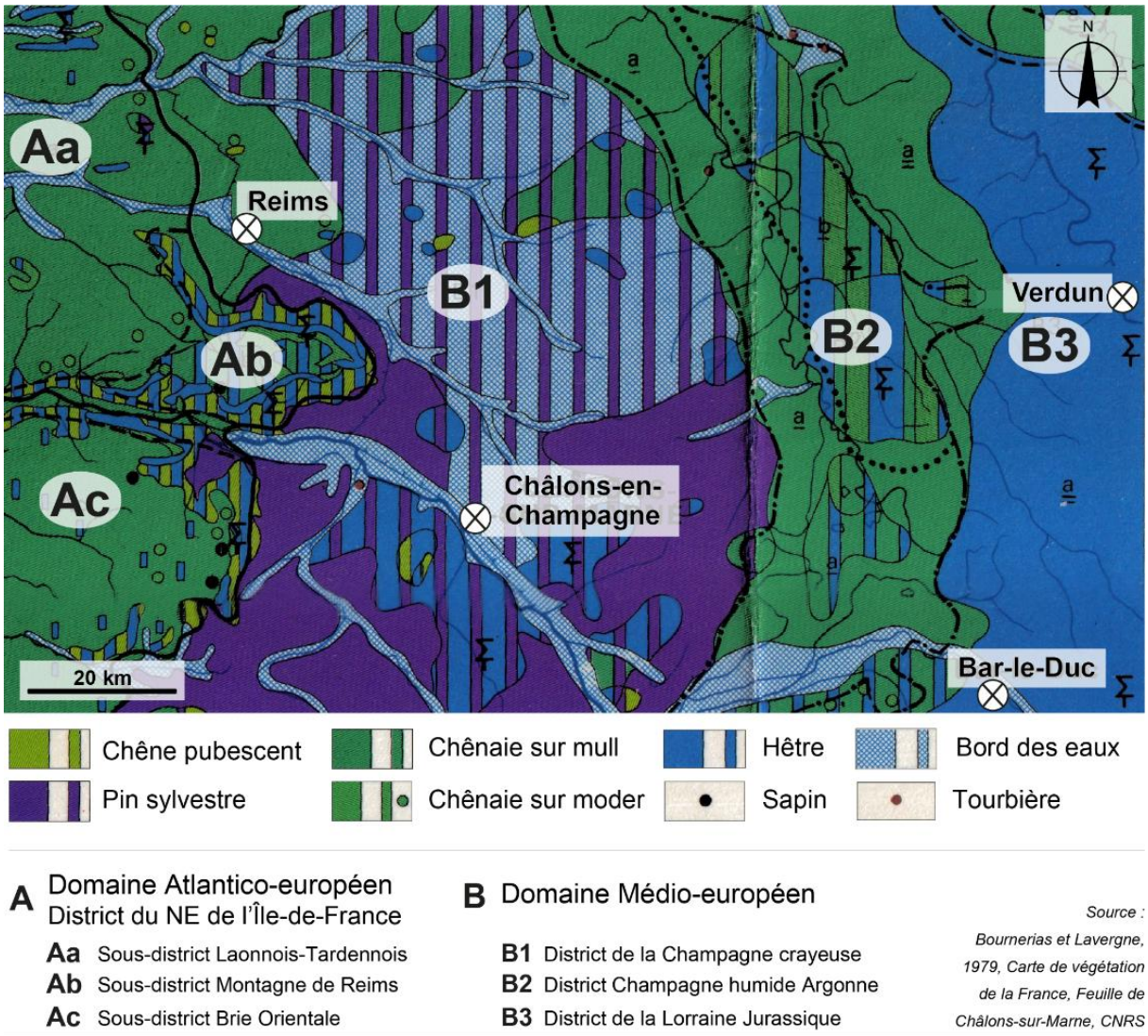


Figure 3.15 : Carton botanique de la feuille de Châlons-sur-Marne de la carte de végétation de la France présentant les grands territoires phytogéographiques.

Cette hétérogénéité des grands types de couvert végétal et des potentialités écologiques est avant tout contrôlée par le contexte géomorphologique, dont la structure géologique et l'organisation du relief.

D'une part, le plateau crayeux de Champagne, largement ouvert et soumis à une forte anthropisation agricole, est caractérisé par des sols minces, bien drainés et fortement exposés. Le développement d'une activité agricole intensive se développe effectivement au lendemain de la Seconde Guerre mondiale, sous l'impulsion de la révolution agricole (motorisation, généralisation des engrais chimiques, remembrement), faisant de la Champagne l'une des régions agricoles les plus productives de France (Chevalier, 1972). Aujourd'hui, plus de 80 % de la surface totale est occupée par les cultures céréalières et betteravières, structurées en openfield et classées dans les « formations herbacées » des données de couverture du sol de l'OCS GE (fig. 3.16B-C, 3.17).

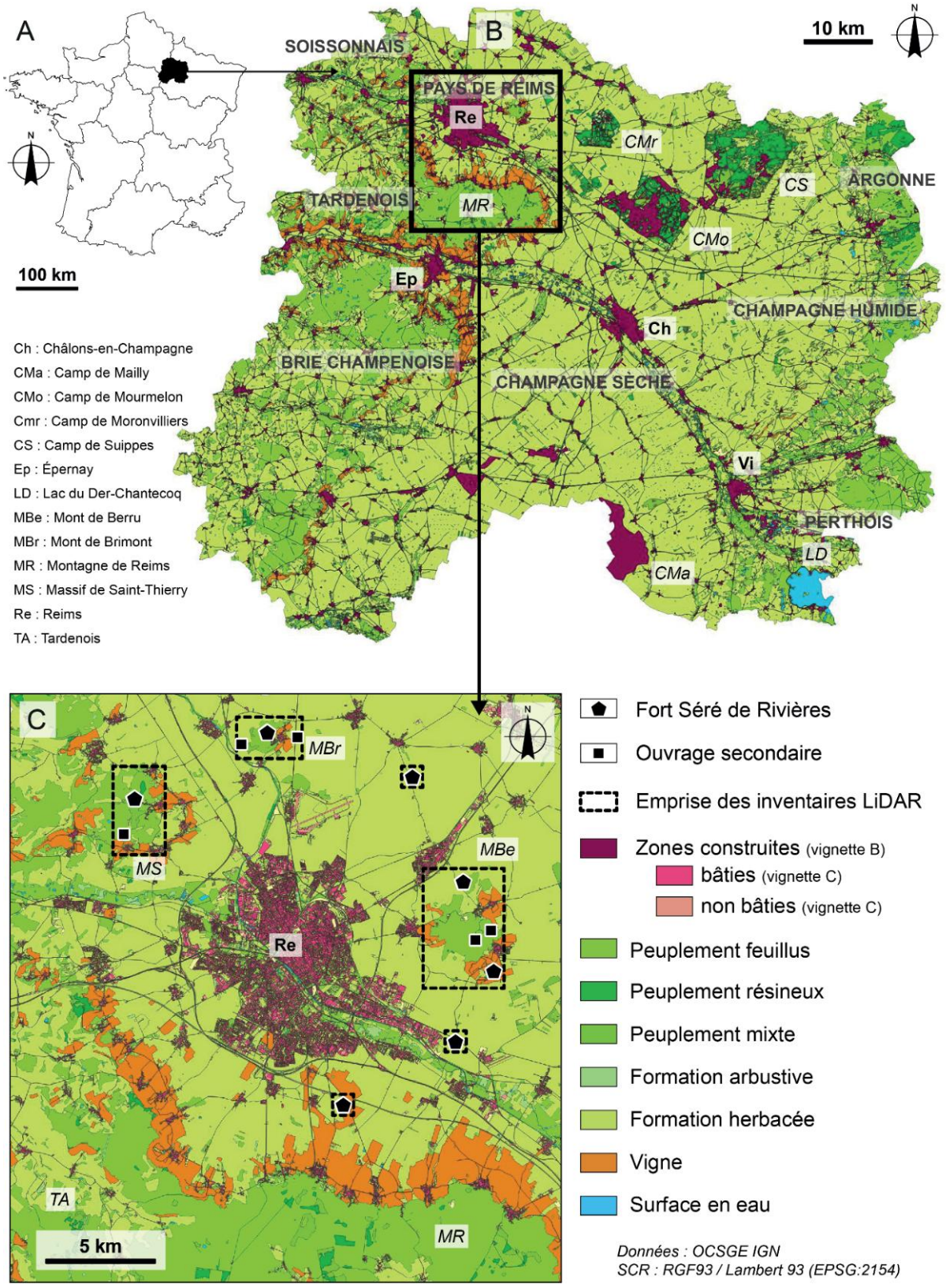


Figure 3.16 : Couverture du sol actuelle du secteur d'étude. A : Carte de localisation de la Marne ; B : Couverture du sol de la Marne ; C : Couverture du sol de la région de Reims.

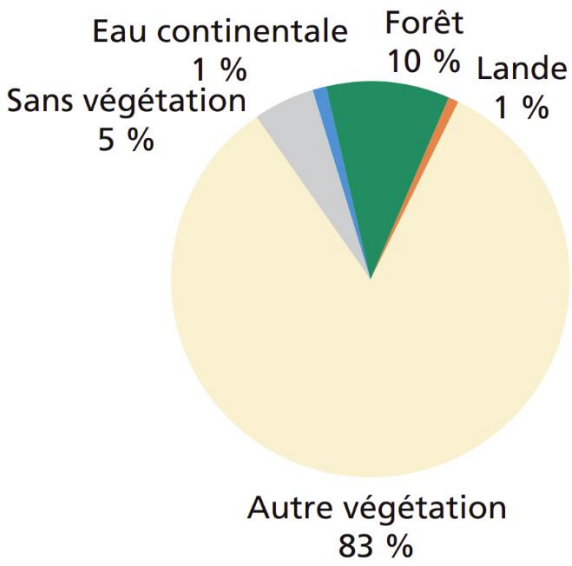


Figure 3.17 : Occupation du sol par les formations végétales et les espaces agricoles (Inventaire forestier, 2012).

Le couvert végétal est discontinu et restreint (10 % ; fig. 3.17), dominé par les plantations résineuses et les milieux ouverts, en grande partie situé dans les grands camps militaires implantés depuis plus d'un siècle : le Camp de Châlons (actuel Camp de Mourmelon, 10 000 ha), créé dans les années 1850 ; le Camp de Moronvilliers (2 500 ha) et le Camp de Suippes (13 500 ha), établis après la Première Guerre mondiale sur des secteurs classés en zone rouge (Tabeaud et Browaeys, 2019).

La structure agricole en openfield est par ailleurs ponctuée de ripisylves créant des corridors végétalisés (Aisne, Vesle, Marne, *etc.*), le long desquelles se sont établies les principales agglomérations (Reims, Châlons-en-Champagne, Vitry-le-François, Épernay) et un habitat villageois dense, majoritairement sous forme de villages-tas (fig. 3.16B-C).

D'autre part, les reliefs de formations tertiaires associés à la côte d'Île-de-France (Tardenois, le Soissonnais, Montagne de Reims, Monts de Berru et de Brimont), plus diversifiées et topographiquement étagées (sables, argiles, calcaires), favorisent le maintien de milieux forestiers et subnaturels plus continus. Les peuplements arborés climaciques y sont dominés par *Quercus sp.* prenant majoritairement la forme d'une chênaie mixte composée des chênes pédonculé (*Quercus robur*) et sessile (*Quercus petraea* ; Bournérias et Timbal, 1979). La forêt occupe les espaces sommitaux, tandis que le vignoble champenois s'intercale dans les talus bien exposés, en transition avec le plateau agricole.

Leur présence implique un contrôle topographique multiscalaire sur la végétation, à l'échelle des principales unités de reliefs (cuesta, butte-témoins, avant-buttes), mais également à plus grande échelle en fonction de leurs composantes internes (revers, front, talus, glacis, vallons, *etc.*) qui induisent une forte variabilité locale des expositions et influencent, par exemple, les conditions édaphiques ou le régime hydrique.

Ces deux grands ensembles paysagers, s'intégrant dans deux domaines bioclimatiques distincts, suggèrent une diversité paysagère et écologique, en partie induite par les paramètres géomorphologiques. Cette dernière est présentée plus en détail dans la section suivante.

3.1.5.2. Des ensembles biogéographiques contrastés au sein de la ceinture fortifiée

La forte hétérogénéité spatiale des contextes écologiques, suggérée dans la section précédente, forme une mosaïque de milieux au sein desquels s'insèrent les ouvrages fortifiés. Cette sous-partie vise à caractériser ces grands ensembles biogéographiques à partir de la cartographie des formations végétales naturelles et semi-naturelles et des statistiques associées, issues de la BD Forêt v2 de l'IGN (fig. 3.18A-H ; annexe 13).

3.1.5.2.1. La Champagne crayeuse

Le district de la Champagne sèche est caractérisé par une végétation éparse surtout composée de landes et de conifères. Elle prend racine sur des sols carbonatés, peu profonds (*c.* 30 cm), bien drainés et saturés (calcosols, rendosols), développés sur les poches de cryoturbation ou les graveluches. La figure 3.18A-H montre une forte représentation de pinèdes à *Pinus sylvestris* et *Pinus nigra*, ainsi que de pelouses calcaires principalement couvertes de Poacées (*e.g.*, *Bromus erectus* ; *Festuca ovina*, *Brachypodium pinnatum*) souvent associées à une fruticée à Genévrier commun (*Juniperus communis ;* les savarts *;* fig. 3.19), adaptées aux sols carbonatés contraints par une faible épaisseur.

Les camps militaires constituent des espaces singuliers par leur superficie, ainsi que par leur statut foncier, ayant participé à la sanctuarisation de vastes espaces semi-naturels laissés en libre-évolution depuis 75 ans. Cela favorise l'existence d'une richesse floristique et faunistique élevée et l'existence d'espèces rares et/ou protégées (*e.g.*, le sisymbre couché et le gaillet de Fleurot) inventoriés dans le cadre des ZNIEFF (fig. 3.19, 3.20), toutefois perturbée par l'intense activité cynégétique réalisée dans ces camps. De même, les savarts, revêtant les gradients de naturalité potentielle les plus élevés de la région, sont aujourd'hui protégés au titre de la Directive Habitat du réseau Natura 2000 (fig. 3.20). Ces espaces militaires constituent aujourd'hui des réservoirs de biodiversité essentiels à la continuité écologique régionale en Champagne, en contexte fortement anthropisé, en assurant la connexion entre le Plateau lorrain et les forêts d'Argonne à l'est et les plateaux de formations cénozoïques à l'ouest (fig. 3.15, 3.16, 3.18A-H, 3.20).

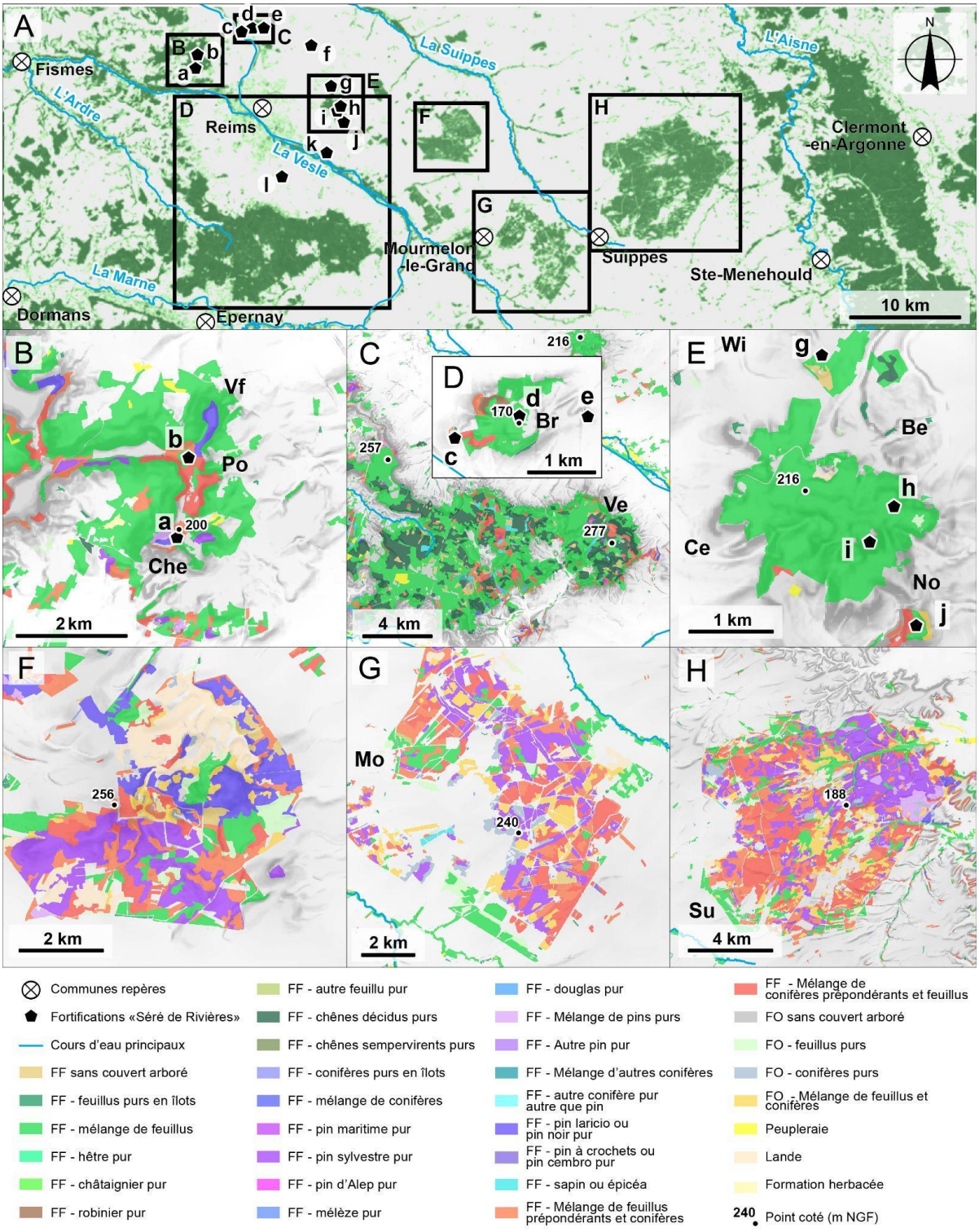


Figure 3.18 : Carte des formations végétales naturelles et semi-naturelles de plus de 0,5 ha (données : BD Forêt® v2, CLC 2015 ; FF. Forêt fermée ; FO. Forêt ouverte). A : Couverture arborée en 2015 ; B : Massif de Saint-Thierry ; C : Montagne de Reims ; D : Mont de Brimont ; E : Mont de Berru ; F : Camp de Moronvilliers ; G : Camp de Mourmelon ; H : Camp de Suippes. a : Réduit de Chenay ; b : Fort de Saint-Thierry ; c : Batterie de Loivre ; d : Fort de Brimont ; e : Batterie du Cran de Brimont ; f : Fort de Fresne ; g : Fort de Witry-lès-Reims ; h : Batterie de Berru ; i : Vigie de Berru ; j : Fort de Nogent-L'Abbesse ; k : Fort de la Pompelle ; l : Fort de Montbré. Be : Berru ; Br : Brimont ; Ce : Cernay-lès-Reims ; Che : Chenay ; Mo : Mourmelon-le-Grand ; No : Nogent-l'Abbesse ; Po : Pouillon ; Su : Suippes ; Ve : Verzy ; Vf : Villers-Franqueux ; Wi : Witry-lès-Reims.



Figure 3.19 : Les savarts (pelouses sèches) du camp de Mourmelon (cl : Alain Devos).

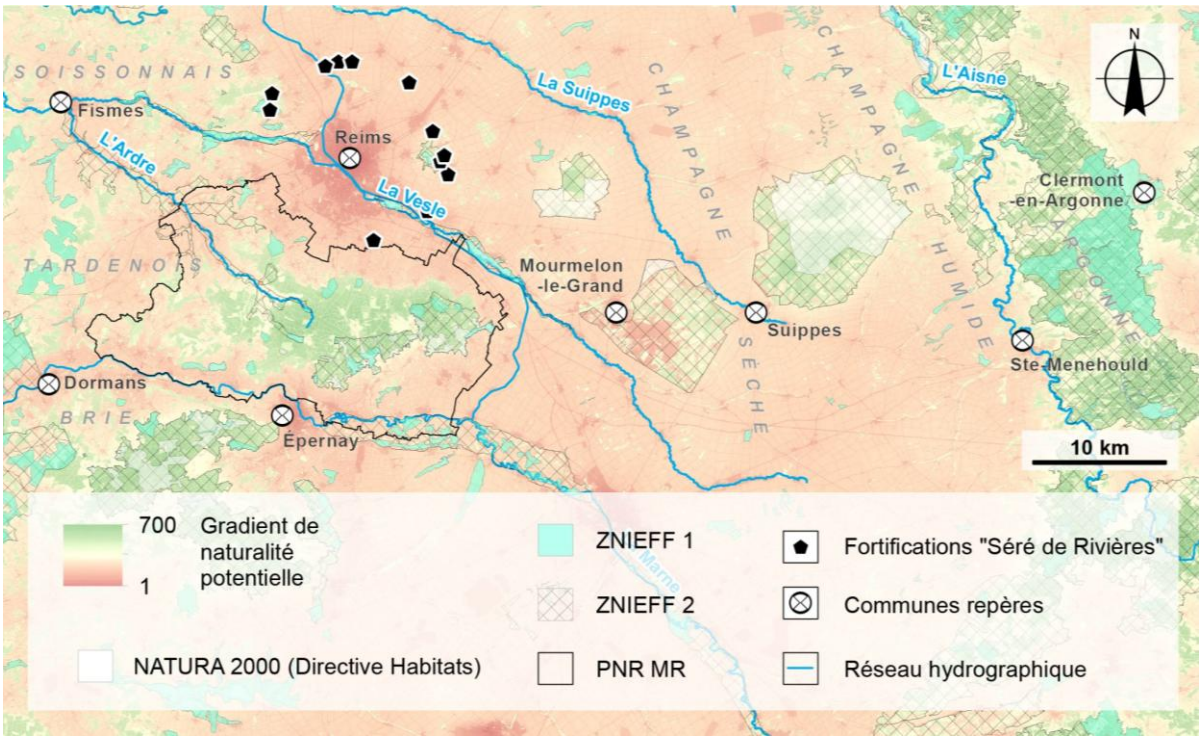


Figure 3.20 : Carte du gradient de naturalité potentielle de la Champagne et des régions environnantes (étirement par écart-type) croisée aux emprises des espaces protégés ou inventoriés au titre des ZNIEFF (données : CATNAT). Le gradient de naturalité résulte de la combinaison avec pondération égale des cartes d'intégrité biophysique de l'occupation du sol, d'influence anthropique et de continuités spatiales (Guetté et al., 2021). Les Réserves Naturelles Régionales, dont l'emprise est restreinte, ne sont pas représentées.

Les autres milieux écologiquement remarquables se concentrent autrement dans les principaux espaces ripariens des cours moyens de la Marne et de l'Aisne, ainsi que dans les vallées de la Vesle et de la Retourne, malgré la présence de peupleraies (forêts alluviales, boisements marécageux, marais, prairies inondables, mégaphorbiaies, roselières, *etc.*). De manière générale, la pression humaine agricole et viticole s'avère prégnante sur le plateau, avec un gradient de naturalité potentielle particulièrement bas notamment autour de Reims (fig. 3.20, 3.21). La partie crayeuse de la ceinture fortifiée offre donc peu de potentialités à la conservation des traces topographiques d'occupation humaine, à l'exception d'îlots résiduels sur les avant-buttes et buttes-témoins abordés ci-après.

3.1.5.2.2. Reliefs de formations tertiaires

Les reliefs de formations tertiaires s'intègrent quant à eux au sein du district NE de l'Île-de-France. Il inclut la Montagne de Reims, qui constitue le plus gros massif forestier de la région, et le Massif de Saint-Thierry, ainsi que les deux buttes-témoins qui en constituent des émanations au sein du domaine médio-européen (fig. 3.15).

Ces reliefs présentent un couvert forestier continu dominé par une forêt fermée de feuillus ponctuée de plantations de conifères (fig. 3.18A-E ; annexe 13). En dehors de la Montagne de Reims, l'emprise forestière concernée dans les inventaires LiDAR correspond intégralement à de la forêt privée, à l'exception d'une dizaine d'hectares sur la commune de Hermonville. Cette présence forestière, favorable à la conservation des vestiges archéologiques en surface, ressort dans les statistiques d'occupation du sol relatives aux trois sous-secteurs concernés par les inventaires LiDAR menés dans le cadre de la thèse (*cf.* partie 4.3), dont l'emprise est reportée sur la figure 3.16C. La proportion de formations arborées y est, en effet, plus élevée qu'en Champagne, atteignant un peu moins d'un tiers de la surface pour les buttes-témoins, qui sont isolées au milieu des espaces agricoles, mais presque les deux tiers pour le secteur du Massif de Saint-Thierry (tab. 3.2 ; fig. 3.16C, 3.17).

	Superficie	Formations arborées (dont conifères)	Formations herbacées	Zones artificialisées	Vignes	Autres
MdBr	5 km²	28,7 %	50,7 %	10,6 %	9,8 %	0,2 %
MdBe	19 km²	29,7 %	45,9 %	8,4 %	15,7 %	0,3 %
MdST	8 km²	63 %	15,3 %	11,2 %	10,2 %	0,2 %
Autres	3 km²	8,3 %	70,7 %	2,1 %	17,5 %	1,5 %

Tableau 3.2 : Part de chaque grand type d'occupation du sol dans les sous-secteurs des inventaires LiDAR (fig. 3.16C). MdBe : Mont de Berru ; MdBr : Mont de Brimont ; MdST : Massif de Saint-Thierry ; Autres : Secteurs des forts de Fresne, Montbré et la Pompelle.

Sur le plateau de la Montagne de Reims (fig. 3.18C), drapé d'Argiles à meulière favorables aux sols hydromorphes et caillouteux, le manteau forestier caducifolié continu est dominé par la hêtraie-chênaie acidophile et la chênaie oligotrophe à chêne sessile. Il est interrompu ponctuellement par des îlots de plantations de conifères (*Abies alba*, *Picea abies*), plus

rarement par des pinèdes et des peupleraies et par des villages-clairières associés au finage rural (*e.g.*, Germaine, Saint-Imoges, Ville-en-Selve ; Berthe, 2024 ; Ancelin et al., 2025).

En revanche, la plateforme structurale calcaire du Massif de Saint-Thierry est occupée par une chênaie pédonculée mélangée à des pins qui sont parfois regroupés en peuplements monospécifiques, comme au sommet du promontoire dominant la commune de Villers-Franqueux (fig. 3.18B). Les sommets comportent par ailleurs des pelouses sèches calcicoles, plus rarement marneuses, et des fruticées et autres boisements de recolonisation.

Dans les versants et sur les buttes-témoins, la végétation, dominée par des forêts caducifoliées de type chênaie-charmaie neutrophile et acidophile, est susceptible d'évoluer en fonction du substratum et des paramètres climatiques et édaphiques (Laurain, 1986). Cette chênaie-charmaie domine les sables calcaires du Thanétien supérieur lorsqu'il n'est pas recouvert par la vigne, de même que les argiles sparnaciennes, souvent recouvertes de colluvions sablo-calcaires provenant des couches sus-jacentes (Sables de Cuise, calcaires lutétiens). Elle peut également comporter des pelouses calcicoles sableuses associées à quelques accrus caducifoliés et de plantation de pins susceptibles de persister là où le sable affleure au sud du massif (*e.g.*, certaines carrières ; ZNIEFF I *Pelouses et pinèdes de Châlons-sur-Vesle, de Merfy et de Chenay ;* fig. 3.21).

Plus localement, des milieux humides apparaissent dans des replats au droit de formations marno-sableuses, à la base de la série sédimentaire cénozoïque (Thanétien moyen ; *e.g.*, ZNIEFF I du *Marais du Vivier à Chenay et Trigny*) ou sur les argiles yprésiennes du Mont de Berru, où des prairies humides oligotrophes à molinie (*Molinia caerulea*) et des tourbières basses alcalines sont protégées au titre de la Directive Habitats du réseau NATURA 2000 (fig. 3.21).

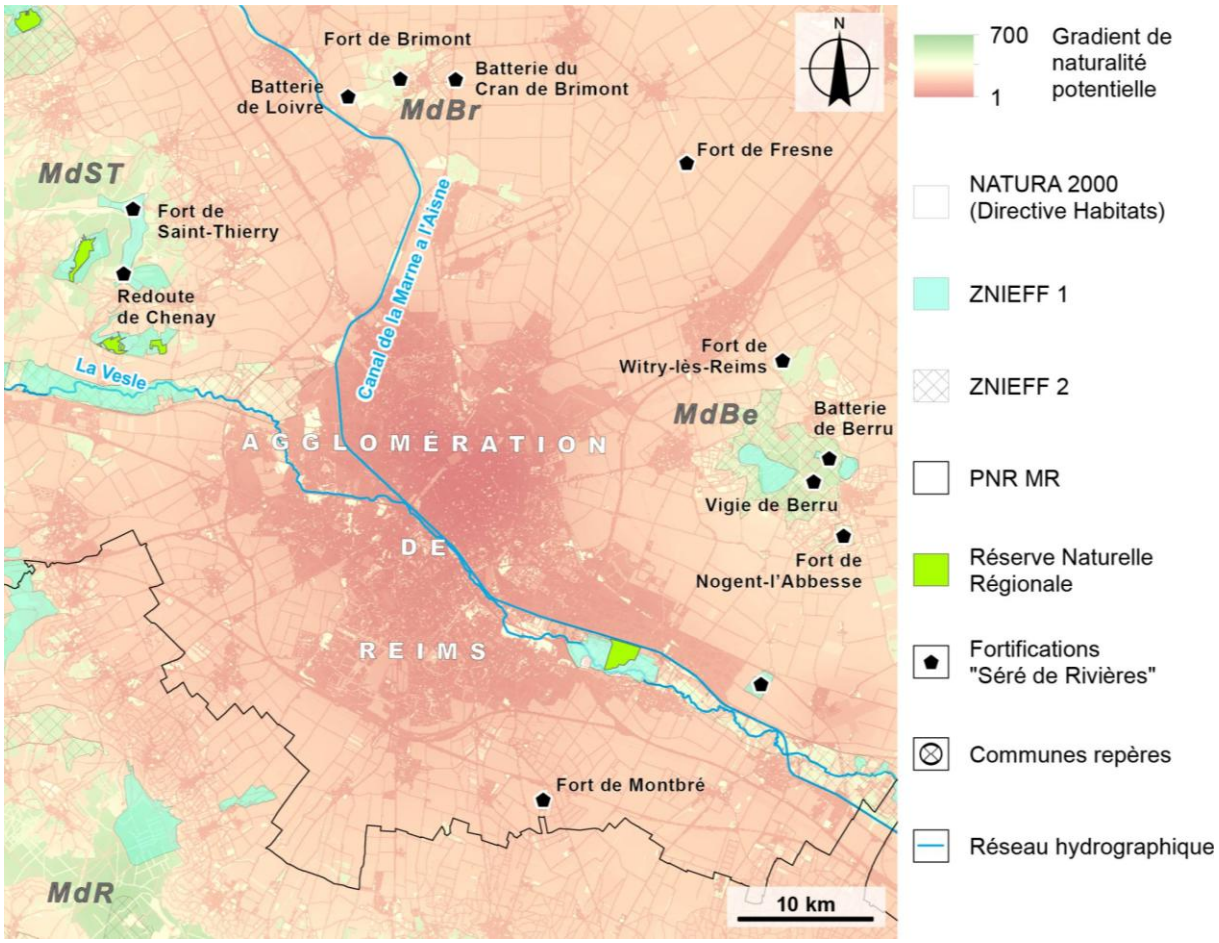


Figure 3.21 : Carte du gradient de naturalité potentielle du secteur de la ceinture fortifiée Séré de Rivières de Reims (étirement par écart-type) croisée aux emprises des espaces protégés ou inventoriés au titre des ZNIEFF (données : CATNAT).

Le gradient de naturalité potentielle est sensiblement plus élevé sur les formations tertiaires que sur la craie de la Champagne sèche où le forçage anthropique est dominant. À cette échelle régionale, les forts de la ceinture de Reims situés sur les buttes-témoins s'inscrivent dans des paysages forestiers (Saint Thierry, Brimont, Nogent) alors que ceux situés sur la craie (Pompelle, Montbré, Fresne) constituent de rares îlots de naturalité qui risquent un effacement sans dispositif de protection.

3.1.5.3. Contextes végétaux actuels au droit des ouvrages fortifiés

À l'échelle de la ceinture fortifiée de Reims, les forts et ouvrages secondaires s'inscrivent aujourd'hui dans des contextes végétaux contrastés, au sein d'une organisation paysagère typique des cuestas de l'est du Bassin parisien. Cette sous-partie décrit l'environnement immédiat de chaque site fortifié à partir des orthophotographies (fig. 3.22) et de l'occupation du sol issue de l'OCS GE de l'IGN (*cf.* partie 4.2.1).

Les orthophotographies de la figure 3.22A-L mettent en évidence un contraste net entre, d'une part, des sites situés dans une matrice à dominante agricole, où les cultures sont

majoritairement classées en formations herbacées, et, d'autre part, des sites inscrits dans une matrice à dominante forestière, représentée par des formations arborées (fig. 3.23A-C ; 3.24A-C).

Le premier cas concerne les forts de la Pompelle et de Fresne, ainsi que la batterie du Cran de Brimont (fig. 3.22E-F, K), implantés au sein d'un paysage ouvert structuré par les grandes parcelles cultivées. Il inclut également les forts de Nogent-l'Abbesse et de Montbré, qui se distinguent par la proximité immédiate ou l'encerclement partiel de parcelles viticoles (fig. 3.22J, L). Dans ces secteurs, les formations arborées sont rares, fragmentées, parfois presque absentes (*e.g.*, fort de Fresne), souvent cantonnées à l'emprise des ouvrages ou au relief environnant. Les forts y apparaissent comme des éléments ponctuels dans une matrice agricole dominante, dont le contraste de texture et de teinte renforce la lisibilité de leur emprise dans le paysage.

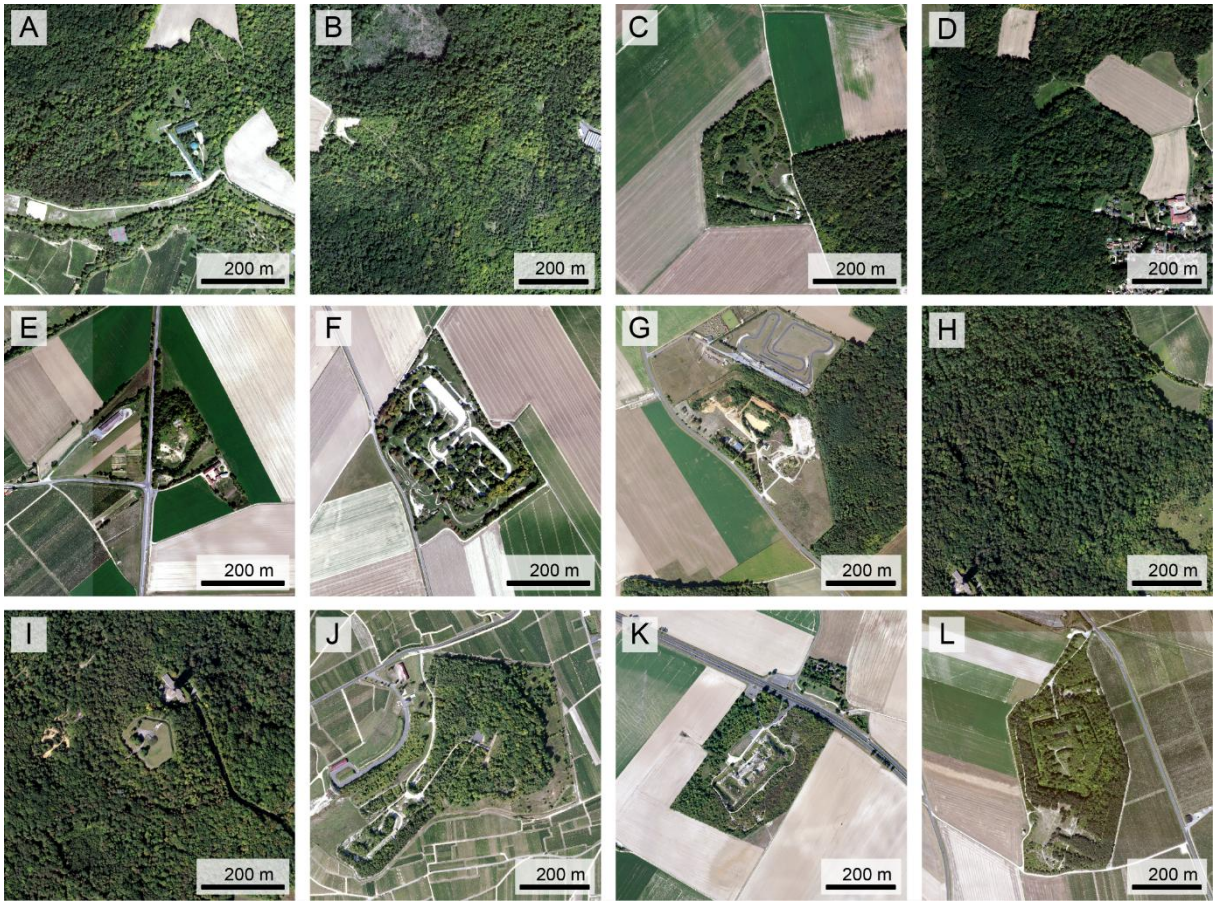


Figure 3.22 : Orthophotographie de chaque site fortifié (BD ORTHO®, 2019, IGN). A : Réduit de Chenay ; B : Fort de Saint-Thierry ; C : Batterie de Loivre ; D : Fort de Brimont ; E : Batterie du Cran de Brimont ; F : Fort de Fresne ; G : Fort de Witry-lès-Reims ; H : Batterie de Berru ; I : Vigie de Berru ; J : Fort de Nogent-l'Abbesse ; K : Fort de la Pompelle ; L : Fort de Montbré.

Sur les buttes-témoins, certains ouvrages répondent à une logique semblable, en se situant toutefois dans une position plus ambiguë, à la fois entourés de champs agricoles et

juxtaposés à une surface boisée de plus grande envergure, tels qu'au fort de Witry-lès-Reims (fig. 3.22G, 3.24A) et à la batterie de Loivre (fig. 3.22C, 3.24C).

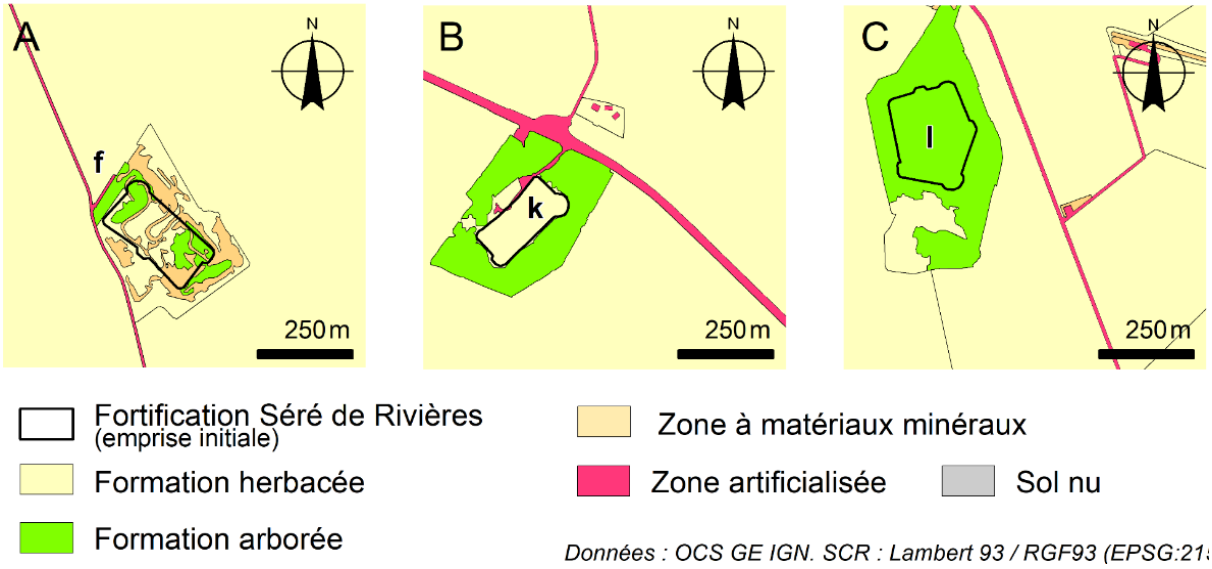


Figure 3.23 : Zoom sur la couverture du sol des trois sous-secteurs d'un km² isolés au sein du plateau crayeux. A : Fort de Fresne (f) ; B : Fort de la Pompelle (k) ; C : Fort de Montbré (l).

À l'inverse, les forts de Brimont et de Saint-Thierry, ainsi que les ouvrages de Chenay et de Berru, s'insèrent dans une matrice à dominante forestière (fig. 3.22A-B, D, H-I). Leur implantation sommitale, sur les hauteurs des buttes-témoins ou sur le revers de la côte d'Île-de-France, coïncide avec la permanence du couvert arboré continu, en grande partie formé par les chênaies-charmaies. Dans ces contextes, l'ouvrage tend à se confondre davantage avec la matrice boisée. La présence des structures fortifiées constitue toutefois un « *crypto-paysage imprimé dans le couvert végétal* » (Durup de Baleine, 1998), localement perceptible par des ruptures de structures du couvert, via des clairières ou des discontinuités linéaires paraphrasant certaines structures internes.

Un point commun à ces différentes situations réside dans la faible exposition directe des sites aux dynamiques urbaines actuelles. Les orthophotographies ne montrent pas de contexte fortement urbanisé au droit des ouvrages, à l'exception du fort de Brimont, situé au contact d'un lotissement du village éponyme, et du fort de la Pompelle, progressivement atteint par l'agrandissement d'une zone industrielle de l'agglomération rémoise (fig. 3.16C). Cette relative mise à l'écart, également traduite par la faible part des zones artificialisées dans les principaux secteurs (fig. 3.24A-C), indique un isolement global des ouvrages vis-à-vis de la périurbanisation de l'agglomération rémoise à l'œuvre sur les villages de la Communauté Urbaine du Grand Reims (CUGR).

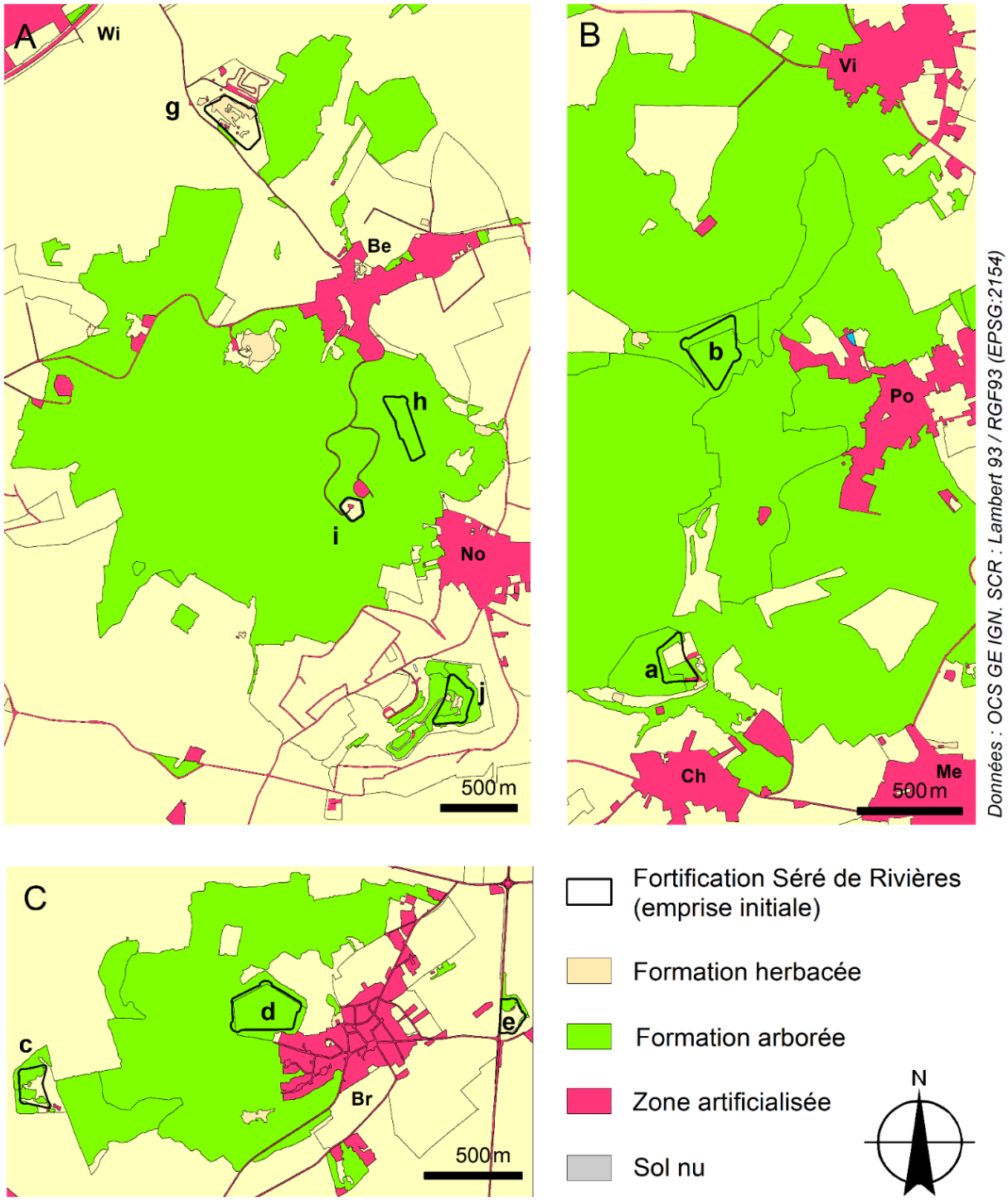


Figure 3.24 : Zoom sur la couverture du sol des trois principaux secteurs d'étude. A : Mont de Berru ; B : Massif de Saint-Thierry ; C : Mont de Brimont. a : Réduit de Chenay ; b : Fort de Saint-Thierry ; c : Batterie de Loivre ; d : Fort de Brimont ; e : Batterie du Cran de Brimont ; f : Fort de Fresne ; g : Fort de Witry-lès-Reims ; h : Batterie de Berru ; i : Vigie de Berru ; j : Fort de Nogent-L'Abbesse ; k : Fort de la Pompelle ; l : Fort de Montbré. Be : Berru ; Br : Brimont ; Ch : Chenay ; Me : Merfy ; No : Nogent-l'Abbesse ; Po : Pouillon ; Vi : Villers-Franqueux ; Wi : Witry-lès-Reims.

La caractérisation de l'occupation du sol aux échelles régionale et locale met en évidence une forte variabilité du gradient de naturalité potentielle au sein de la ceinture fortifiée rémoise. Deux grands ensembles paysagers se distinguent. D'une part, les paysages agricoles

ouverts de la Champagne crayeuse traduisent une pression agro-viticole élevée sur la majorité des ouvrages, selon des configurations contrastées allant de l'isolement complet à une simple juxtaposition avec des lisières forestières. D'autre part, les ouvrages implantés sur les formations tertiaires sommitales s'inscrivent majoritairement dans des contextes forestiers continus ou de lisière, globalement plus favorables à la conservation des vestiges archéologiques en surface.

Dans l'ensemble, les forts demeurent faiblement exposés aux dynamiques urbaines contemporaines, même si certains sites apparaissent plus directement concernés par la périurbanisation, comme l'illustre notamment le fort de la Pompelle.

Cette diversité des matrices paysagères et ce relatif isolement constituent un cadre de lecture structurant pour analyser, dans les parties suivantes, les trajectoires paysagères et écologiques des ouvrages. Ils permettent notamment d'interroger les contrastes de dynamique végétale, les modalités différenciées d'enfrichement ou de colonisation, ainsi que les interactions entre héritages morphologiques et dynamiques biogéographiques actuelles. Cette connaissance est en effet déterminante pour interpréter le degré de lisibilité des polémoformes dans les données LiDAR et les modalités d'effacement progressif des formes anthropiques.

Conclusion de la partie 3.1

La ceinture fortifiée de Reims s'inscrit dans un cadre géographique complexe, hérité à la fois des conditions de sédimentation paléogènes et du dégagement des reliefs au Quaternaire. Il place le secteur en situation d'interface géomorphologique entre bas-plateaux étagés, mais aussi en position de passage stratégique contrôlant la percée cataclinale de la Vesle. Les ouvrages prennent ainsi appui sur une diversité de reliefs associés à la cuesta d'Île-de-France, dont la variabilité morphostructurale conditionne des contextes d'implantation contrastés, tant du point de vue de la disponibilité locale en géomatériaux que des propriétés géotechniques des terrains ou des modalités d'écoulement de l'eau.

Les paramètres climatiques, hydrogéologiques et biogéographiques complètent ce cadre environnemental général dans lequel s'inscrivent les processus de transformation, voire d'effacement de la topographie héritée des aménagements anthropiques, en particulier militaires. Sans constituer des facteurs discriminants entre les ouvrages, ils contribuent à expliquer la variabilité spatiale des états de conservation observés aujourd'hui à l'échelle de la ceinture fortifiée, qui sera abordée dans les parties suivantes.

La compréhension de cet environnement physique hétérogène constitue dès lors un préalable indispensable au travail d'inventaire et de cartographie des anomalies topographiques d'intérêt archéologique et géomorphologique. Elle conditionne la bonne interprétation des signatures morphologiques révélées par le LiDAR, en permettant de discriminer les polémoformes des morphologies naturelles et d'optimiser la lecture du palimpseste topographique que représente le paysage géomorphologique actuel.

Cette mise en contexte environnementale ouvre ainsi sur la partie suivante, consacrée au cadre historique, à travers l'évolution de l'occupation ancienne du sol et aux conditions de mise en place des fortifications, afin de replacer les formes observées dans leur trajectoire historique.

3.2. Contexte historique

La partie 3.2 propose une contextualisation historique de la ceinture fortifiée de Reims. Cette mise en perspective est indispensable, dans la mesure où la création puis la transformation des forts Séré de Rivières de type 1874 relèvent de processus fondamentalement historiques, qui participent plus largement de l'empreinte matérielle de l'événement Anthropocène (Edgeworth, 2023).

Dans un premier temps, l'analyse s'attache à caractériser l'occupation du sol ancienne et ses évolutions au cours du siècle précédant la construction des ouvrages (3.2.1). Cet état initial constitue un cadre de référence pour distinguer les morphologies liées à la fortification et aux autres polémoformes de celles relevant de l'environnement archéologique, et pour discuter l'ampleur des transformations géomorphologiques induites par le chantier. Il permet également de mieux saisir les conditions paysagères à partir desquelles les militaires préparent l'implantation des ouvrages et anticipent la conduite des opérations.

Dans un second temps, la partie replace la ceinture fortifiée dans l'histoire militaire régionale, afin de situer les choix opérés à Reims dans un ensemble plus large, et de relativiser les caractéristiques des ouvrages rémois (3.2.2). La prise en compte des deux conflits majeurs du XIXe siècle permet en particulier de comprendre comment se construit, progressivement, l'idée d'une fortification de la place de Reims.

Enfin, une troisième sous-partie examine la mise en œuvre concrète de cette fortification après la guerre franco-prussienne (3.2.3). Elle retrace la traduction locale des décisions prises à l'échelle nationale, dans un contexte de refondation militaire et administrative marqué par l'action du général Séré de Rivières (*cf.* parties 2.2 et 2.3), alors directeur du Génie. Cette séquence, décisive pour la suite de l'analyse, éclaire les conditions de construction, d'évolution et d'usage initial de la ceinture, qui orientent directement les trajectoires des formes observables aujourd'hui.

3.2.1. Agrosylvosystème rural champenois

Cette section vise à caractériser le paysage avant la construction des forts, tel qu'il était perçu par le Génie, en restituant l'occupation ancienne du sol. L'enjeu est de pouvoir s'appuyer sur ce cadre paysager pour dater certaines structures visibles au LiDAR et, de la même manière que pour le cadre physique, d'optimiser la discrimination des polémoformes et des morphologies créées par la fortification. Par ailleurs, les informations recueillies constituent un état initial sur lequel se baser pour déterminer l'impact paysager de la construction de la ceinture fortifiée.

Pour cela, l'évolution de l'occupation des sols du territoire, pendant le siècle précédant la construction des fortifications Séré de Rivières de Reims, est retranscrite à partir de la comparaison de cartes anciennes issues d'une banque de données géohistorique présentée en partie 4.2.2 : carte de Cassini (années 1750), carte d'État-Major (1825-1831), atlas de Poinsignon, atlas départemental des Ponts et Chaussées concomitant (années 1870), et plus ponctuellement, cadastre napoléonien (années 1830), proposant une information des usages du sol à l'échelle parcellaire. L'analyse est effectuée à l'échelle du Pays rémois, puis s'attarde plus spécifiquement sur les trois principaux secteurs retenus pour la réalisation de l'inventaire des structures archéologiques (fig. 3.16C), dont l'histoire diffère sensiblement.

L'accent est notamment mis sur les grands types d'occupation surfacique, en particulier les boisements, qui constituent des réservoirs privilégiés de microreliefs et de structures archéologiques conservées (Georges-Leroy et al., 2009). Il convient par ailleurs d'identifier les secteurs agricoles anciens, majoritaires dans le secteur, afin d'optimiser la caractérisation des morphologies associées fossilisées sous la canopée (fossés, levées, épaulements) et donc de diminuer le risque de confusion avec des formes militaires ultérieures. Un intérêt est enfin porté envers les sites d'extraction susceptibles d'être actifs au XIXe siècle permettant, en plus de caractériser certaines formes, d'envisager, dans les parties suivantes, d'éventuels liens avec la construction des forts de Reims.

3.2.1.1. Fin du XVIIIe siècle

La carte de Cassini, réalisée au milieu du XVIIIe siècle, restitue les grands traits du paysage. Elle constitue le premier témoin cartographique couvrant l'ensemble du secteur d'étude (fig. 3.25). Mais elle doit être interprétée avec précaution du fait d'une représentation parfois schématique de certaines catégories de couverture du sol, dont les entités les plus petites peuvent ne pas être représentées (*e.g.*, les forêts ; *cf.* partie 4.2.2.1 ; Vallauri et al., 2012).

Dans l'ensemble, la structure du paysage actuel ressort. Le territoire s'organise autour de Reims, de laquelle émane un réseau radioconcentrique de voies rayonnantes, qui reprennent pour la plupart les tracés antiques (annexe 14). Ces voies s'étendent d'un côté à travers le plateau de Champagne sèche, avec les routes :

- de Reims à Châlons-sur-Marne et Bar-le-Duc (sud-est), de part et d'autre de la haute vallée de la Vesle ;

- de Reims à Rethel, au pied de la face nord du Mont de Berru, et de Reims à Charleville (nord-est) ;

- de Reims à Montcornet, nommée « chemin de César » (au nord), qui intersecte la partie orientale de la butte de Brimont ;

- de Reims à Berry au Bac, qui longe la côte d'Île-de-France vers le nord-ouest jusqu'à la vallée de l'Aisne.

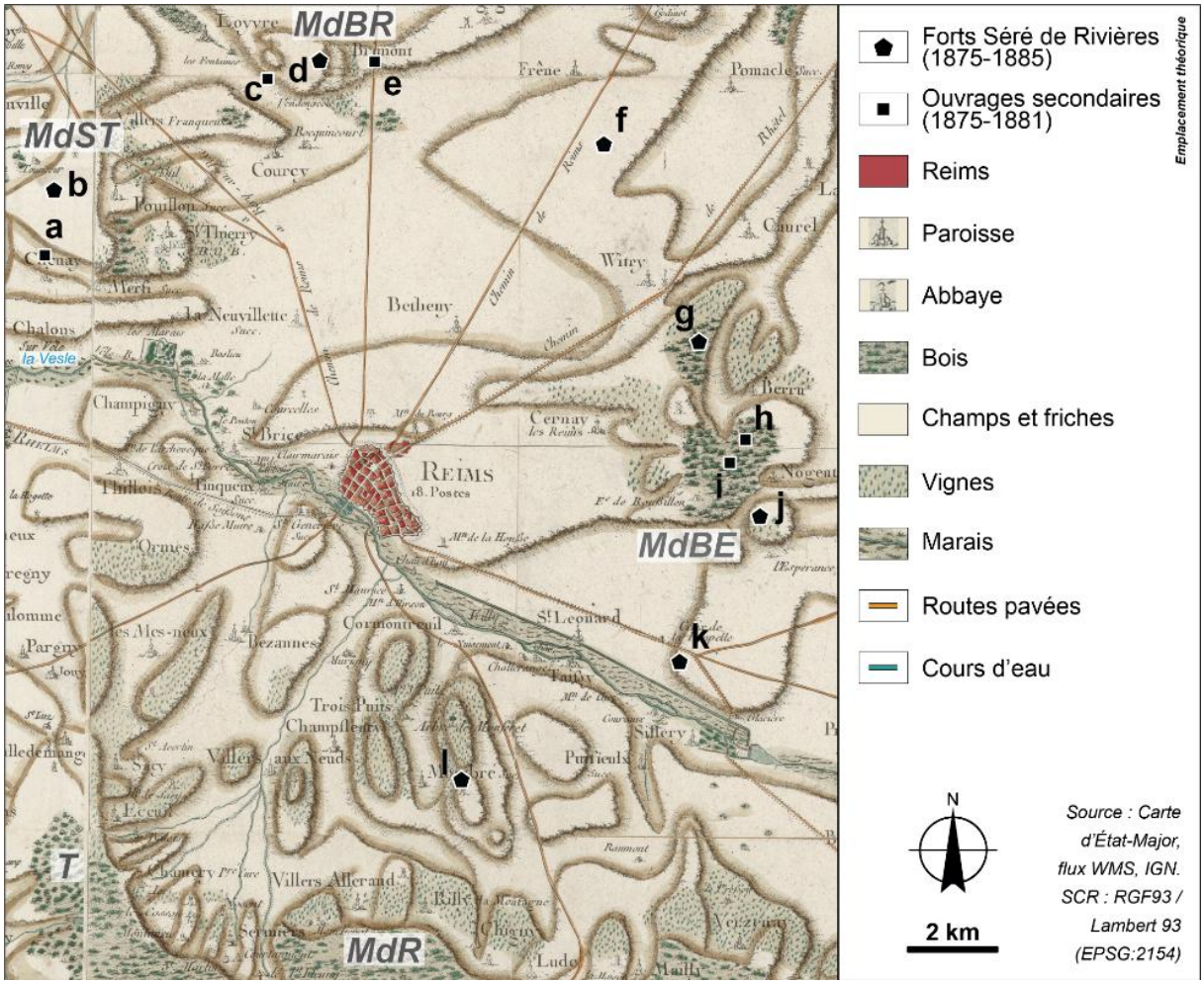


Figure 3.25 : Extrait de la carte de Cassini du Pays rémois (feuilles de Soissons, à l'ouest, et Reims, à l'est ; 1757). a : Réduit de Chenay ; b : Fort de Saint-Thierry ; c : Batterie de Loivre ; d : Fort de Brimont ; e : Batterie du Cran de Brimont ; f : Fort de Fresne ; g : Fort de Witry-lès-Reims ; h : Batterie de Berru ; i : Vigie de Berru ; j : Fort de Nogent-L'Abbesse ; k : Fort de la Pompelle ; l : Fort de Montbré. MdBe : Mont de Berru ; MdBr : Mont de Brimont ; MdR : Montagne de Reims ; MdST : Massif de Saint-Thierry.

À l'opposé, trois autres voies traversent les plateaux de formations cénozoïques, à l'ouest, dans la vallée de la Vesle (de Reims à Fismes et Soissons) et au sud, à travers la Montagne de Reims, via le Craon de Ludes (de Reims à Épernay). Une voie partant vers le sud-ouest, de moindre importance, rejoint la commune de Saint-Euphraise, située à 10 km à travers le Tardenois.

Les villages s'organisent selon un mode d'organisation du bâti concentré et sont entourés de petites ceintures nourricières composées de jardins (annexe 15), caractéristiques des cultures ouvertes (openfield), avec toutefois l'existence de quelques fermes isolées.

Le paysage champenois est dévolu au *saltus*, composé des savarts (fig. 3.19), landes pastorales qui constituaient alors « *le parcours du mouton* » dans le pastoralisme traditionnel

(Féquant, 1986). Dans la trilogie rurale *ager-silva-saltus*, héritée du droit romain et mobilisée en géographie historique, ces savarts constituent des terres collectives, de faible valeur agricole, qui s'insèrent entre de rares parcelles agricoles (*ager*) et la forêt (*silva* ; annexe 16 ; Verdier, 2013). La physionomie de ce paysage amènera Élisée Reclus à décrire la Champagne à la fin du XIXe siècle par « *ses terres arides, ses roches pulvérulentes, son gazon court et ras, le triste aspect de ses cultures, la laideur de ses cabanes et la pauvreté de l'homme* » (Dorel et Duménil, 1983).

Les principaux massifs forestiers se situent en Montagne de Reims et sur le Mont de Berru, mais sont absents des parties sommitales des reliefs nord-occidentaux du Mont de Brimont et du Massif de Saint-Thierry ; absence pouvant soit être effective, soit résulter d'une information forestière lacunaire (Vallauri et al., 2012). Ils sont complétés par un ensemble dispersé de petits boisements situés en contrebas de la butte de Brimont et sur le front de la côte d'Île-de-France, au nord de Merfi (Merfy). Ils s'étendent également le long du corridor marécageux localement drainé, installé dans l'espace riparien de la Vesle qui coupe transversalement le Pays rémois, rivière dont le cours est égrené d'ouvrages hydrauliques (moulins à eau, pont). La surface forestière atteint finalement 20 km² sur l'emprise de la figure 3.25, dont 6 km² hors Montagne de Reims.

Le vignoble s'organise déjà sur les versants crayeux des principaux reliefs (Montagne de Reims, Massif de Saint-Thierry, buttes de Berru et de Brimont), ainsi qu'en rive gauche de la Vesle, sur les flancs et au sommet d'un ensemble d'avant-buttes crayeuses où sera plus tard construit le fort de Montbré.

3.2.1.2. XIXe siècle

Au XIXe siècle, les techniques cartographiques s'affinent, offrant une représentation plus précise de la couverture du sol (*cf.* parties 4.2.2.3-4.2.2.5), notamment à travers la publication de la carte d'État-Major.

Autour de Reims, la carte, levée entre 1825 et 1831, fait apparaître le réseau de chemin de fer à double voies normales et le canal de l'Aisne à la Marne, malgré des mises en service respectives à partir des années 1850 et en 1867 (fig. 3.26 ; *cf.* partie 4.2.2.4). Le réseau suit une organisation analogue à celle des voies antiques, rémanentes dans le réseau routier révélé par la carte de Cassini (fig. 3.25), permettant alors de relier Soissons (ouest), Tergnier (nord), Mézières (nord-ouest), Châlons-sur-Marne et son camp militaire (sud-est), et Épernay (est). Il constitue la structure principale à partir de laquelle s'organise la majeure partie du réseau ferroviaire à voie étroite, utilisé pour le transport de matériaux et de pondéreux pendant la création de la ceinture fortifiée, puis pour celui des munitions pendant la période d'activité des forts et la Première Guerre mondiale.

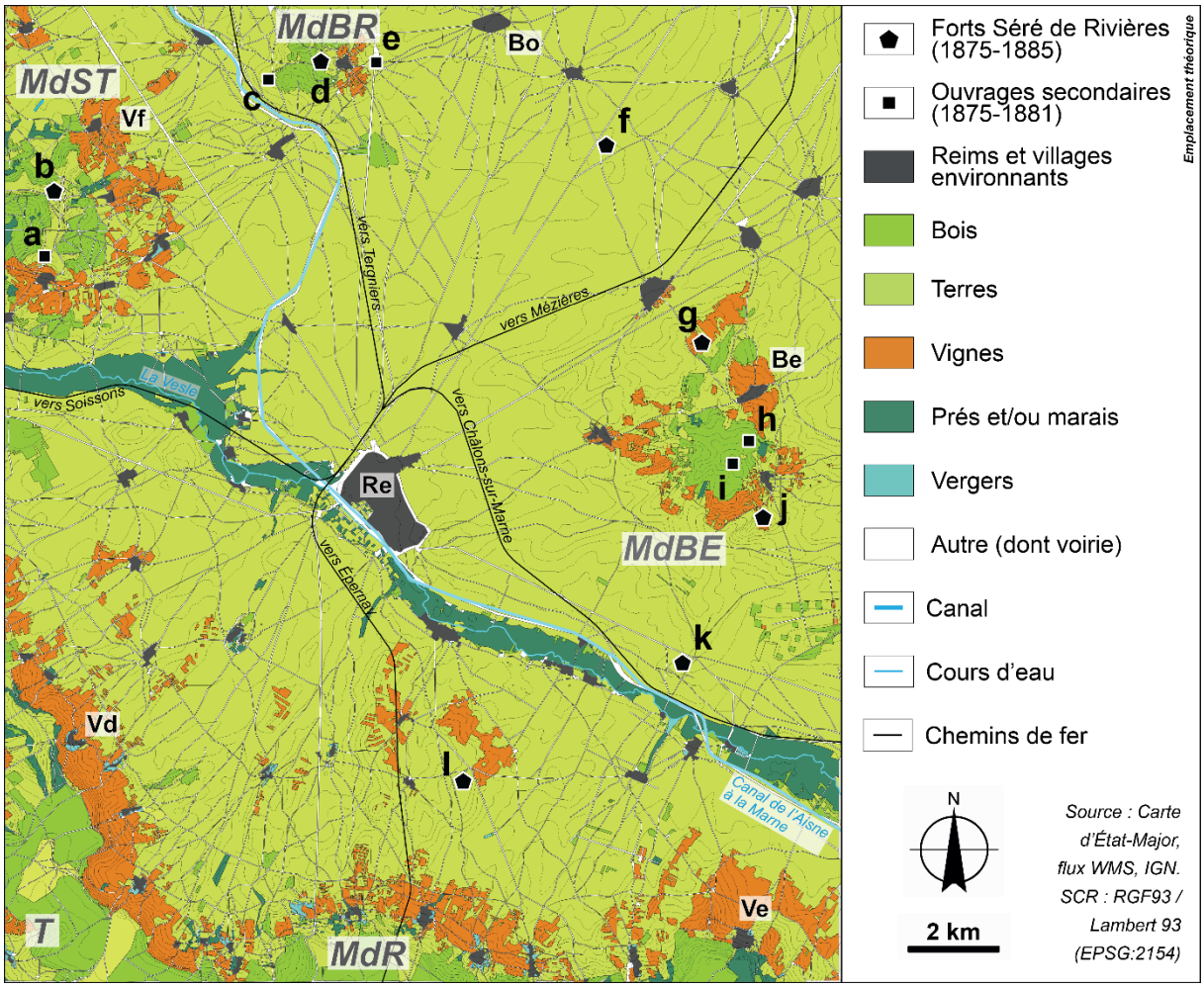


Figure 3.26 : Occupation du sol supposée de la région de Reims en 1830 (*cf.* 4.2.2.4 ; fig. 4.13A-B, 4.14). a : Réduit de Chenay ; b : Fort de Saint-Thierry ; c : Batterie de Loivre ; d : Fort de Brimont ; e : Batterie du Cran de Brimont ; f : Fort de Fresne ; g : Fort de Witry-lès-Reims ; h : Batterie de Berru ; i : Vigie de Berru ; j : Fort de Nogent-L'Abbesse ; k : Fort de la Pompelle ; l : Fort de Montbré. MdBe : Mont de Berru ; MdBr : Mont de Brimont ; MdR : Montagne de Reims ; MdST : Massif de Saint-Thierry ; T : Tardenois. Be : Berru ; Bo : Bourgogne ; Re : Reims ; Ve : Verzy ; Vd : Ville-Dommange ; Vf : Villers-Franqueux.

En Montagne de Reims, l'irrégularité de la lisière forestière, désormais représentée cartographiquement, résulte de l'emboîtement entre les zones boisées et les pâtis communaux (*saltus* pastoral). Elle traduit la dualité de l'économie rurale traditionnelle fondée à la fois sur l'exploitation forestière (bois, droits d'usage) et sur les activités agro-pastorales (production vivrière, élevage).

Sur le front de la côte d'Île-de-France, les vignes occupent toujours les pentes bien exposées et les champs agricoles les espaces les plus bas (*ager*), tandis que les pâtis s'installent en marge plus haut (*saltus*), sur le revers de côte, en transition avec les massifs forestiers (*silva* ; *e.g.*, Trépail ; annexes 16, 17A-C). Ces zones sont souvent qualifiées de « friches » sur le cadastre napoléonien, ce qui suggère le caractère inculte prêté aux sols argileux hydromorphes à forte pierrosité qui drapent le plateau de la Montagne de Reims (Argiles à meulière). Cette dualité *saltus*/*silva* engendre sur la bordure forestière du plateau des

échancrures caractéristiques, particulièrement visibles sur le versant nord de la Montagne de Reims, où les pâtis de Verzenay, Mailly, Rilly-la-Montagne, Chamery, Écueil ou Vrigny forment des péninsules ouvertes dans le massif (annexe 18). Cette logique pastorale appliquée aux milieux difficilement valorisables, est également effective pour le lit mineur de la Vesle, recouvert de prairies humides encadrées de drains et localement sillonnées par des bras annexes, ainsi que pour les savarts non spécifiquement représentés sur la carte d'État-Major.

Plus bas sur le plateau crayeux, les trois avant-buttes aménagées pour la construction des forts de Fresne, la Pompelle et Montbré demeurent dépourvues de surface boisée jusqu'au début des travaux pendant les deux décennies 1870-1890 (fig. 3.27A-D).

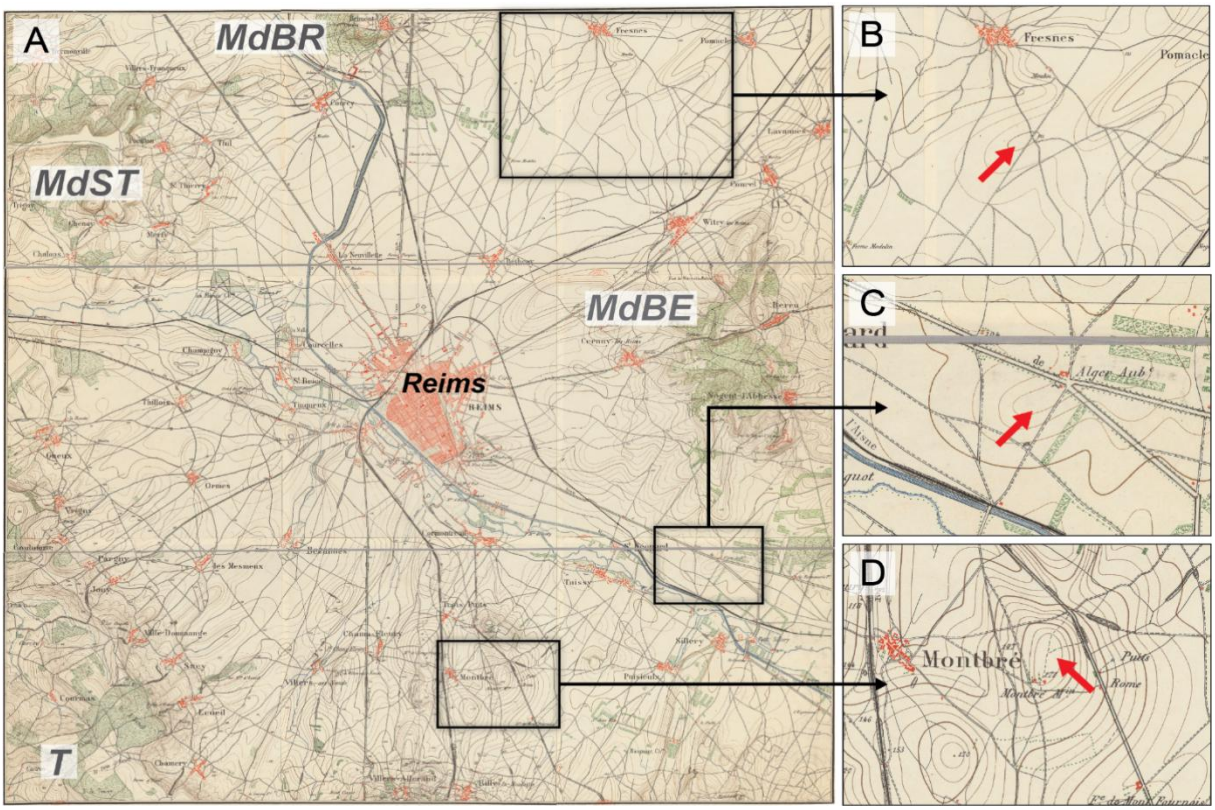


Figure 3.27 : Occupation du sol en 1877 des avant-buttes crayeuses utilisées pour la construction des forts de Reims (les flèches rouges indiquent les sites de construction). A : Plan du Génie édité en 1877 (SHD, GR 1 V H 2141 ; *cf.* partie 4.2.2.5) ; B : Secteur du fort de Fresne ; C : Secteur du fort de la Pompelle ; D : Secteur du fort de Montbré. MdBe : Mont de Berru ; MdBr : Mont de Brimont ; MdST : Massif de Saint-Thierry ; T : Tardenois.

Dans le reste du Pays rémois, si la répartition du vignoble n'a que peu changé, l'organisation du *saltus* et de la *silva* diffère quelque peu, notamment au gré des paramètres environnementaux. Cela concerne en particulier le Mont de Berru, le Mont de Brimont et le Massif de Saint-Thierry, constituant les secteurs d'étude principaux concernés par l'inventaire LiDAR, dont la situation et les particularités paysagères sont présentées dans les sections suivantes.

3.2.1.3. Mont de Berru

Le Mont de Berru se partage au XVIIIe entre les villages de Nogent-l'Abbesse, Witry (aujourd'hui Witry-lès-Reims), Caurel, Berru et Cernay-lès-Reims (fig. 3.28-3.30). Dès le milieu du siècle, la situation forestière est contrastée entre la partie sud, où s'étend le massif principal en majorité sur les argiles, marnes et sables ligniteux de l'Yprésien inférieur, et la partie nord, au-delà d'un axe de Berru à Cernay-lès-Reims, composée de trois bois de taille plus réduite. La carte d'État-Major (1825-1831), puis l'atlas départemental (années 1870), documentent l'apparition puis la pérennisation des premiers boisements monospécifiques de pins, à l'est de la butte (fig. 3.29, 3.30), et au sud-est (fig. 3.26), qui constituent la végétation dominante de la Champagne crayeuse pendant plus d'un siècle (Bournérias et Timbal, 1979)[4]. Cette organisation subsiste jusqu'au dernier tiers du XIXe siècle avec une surface forestière légèrement en hausse entre 1830 et 1874, passant de 367 ha à 420 ha (+ 13 % ; fig. 3.29, 3.30).

Seulement trois pâtures de 4 à 7 ha sont représentées sur le terroir de la commune de Berru, dont la plus grande est située au droit du replat dans les argiles yprésiennes, au nord du village de Nogent-l'Abbesse (fig. 3.2B). Les deux autres sont situées à la transition entre les sables et les argiles sous-jacentes. Elles s'étendent au nord de l'emprise forestière et au sud, à proximité de la ferme du Roucisson, pour laquelle le cadastre napoléonien révèle quatre bâtiments revêtant une organisation en U typique de Champagne, avec une cour ouverte et deux bâtiments ayant pignon sur rue (fig. 3.29).

À travers le cas du Mont de Berru, l'histoire viticole récente donne à voir, de manière particulièrement lisible, le poids de la vigne dans la construction des paysages et des dynamiques rurales du Pays rémois (Coutant et al., 2016, 2024), qui se révèle également dans la microtoponymie révélée par le cadastre napoléonien (fig. 3.28).

[4] À partir du début du XXe siècle, le paysage champenois est en effet caractérisé par « *l'immensité des plantations monospécifiques de pins* » (Bournérias et Timbal, 1979), qui sont progressivement défrichées après la Seconde Guerre mondiale dans le cadre du développement de l'agriculture intensive.

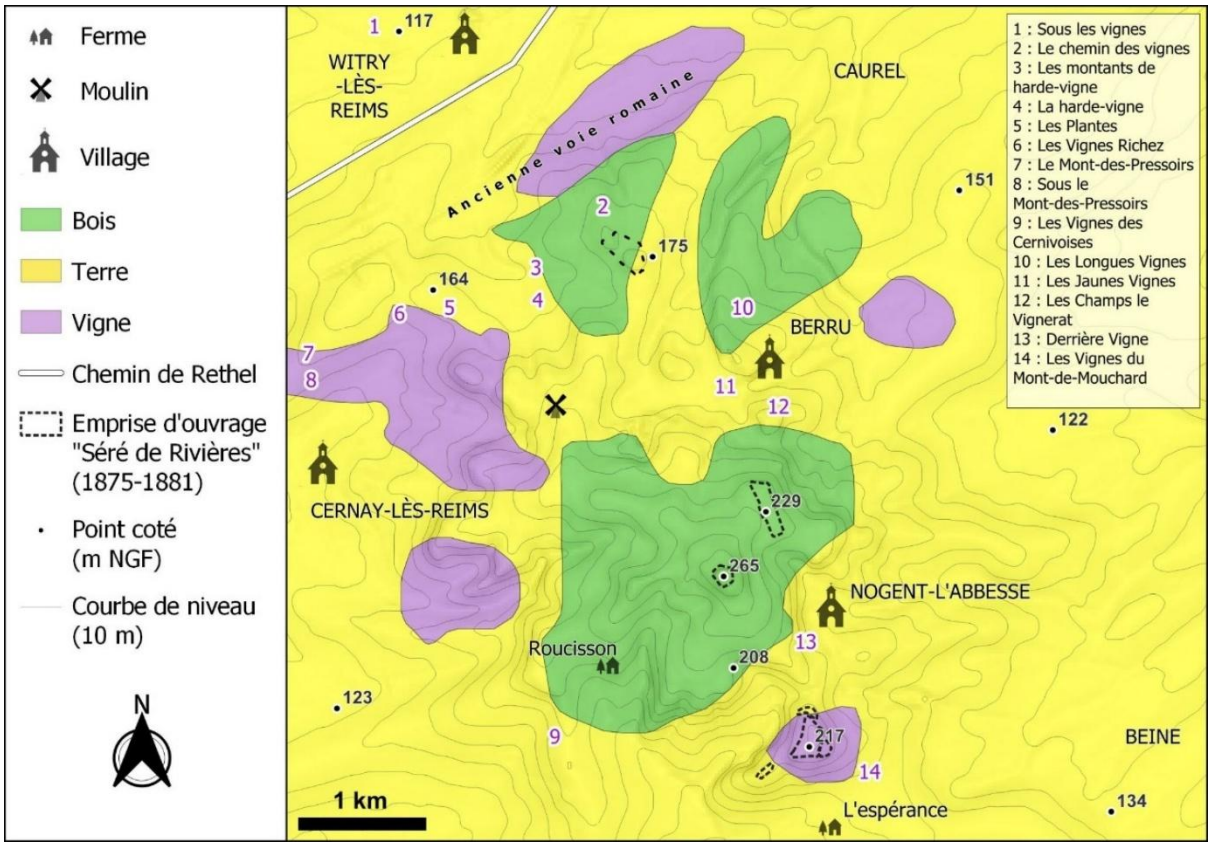


Figure 3.28 : Occupation du sol de la butte de Berru dans les années 1750 (d'après la carte de Cassini, 1757). Les numéros correspondent aux microtoponymes viticoles indiqués sur le cadastre napoléonien.

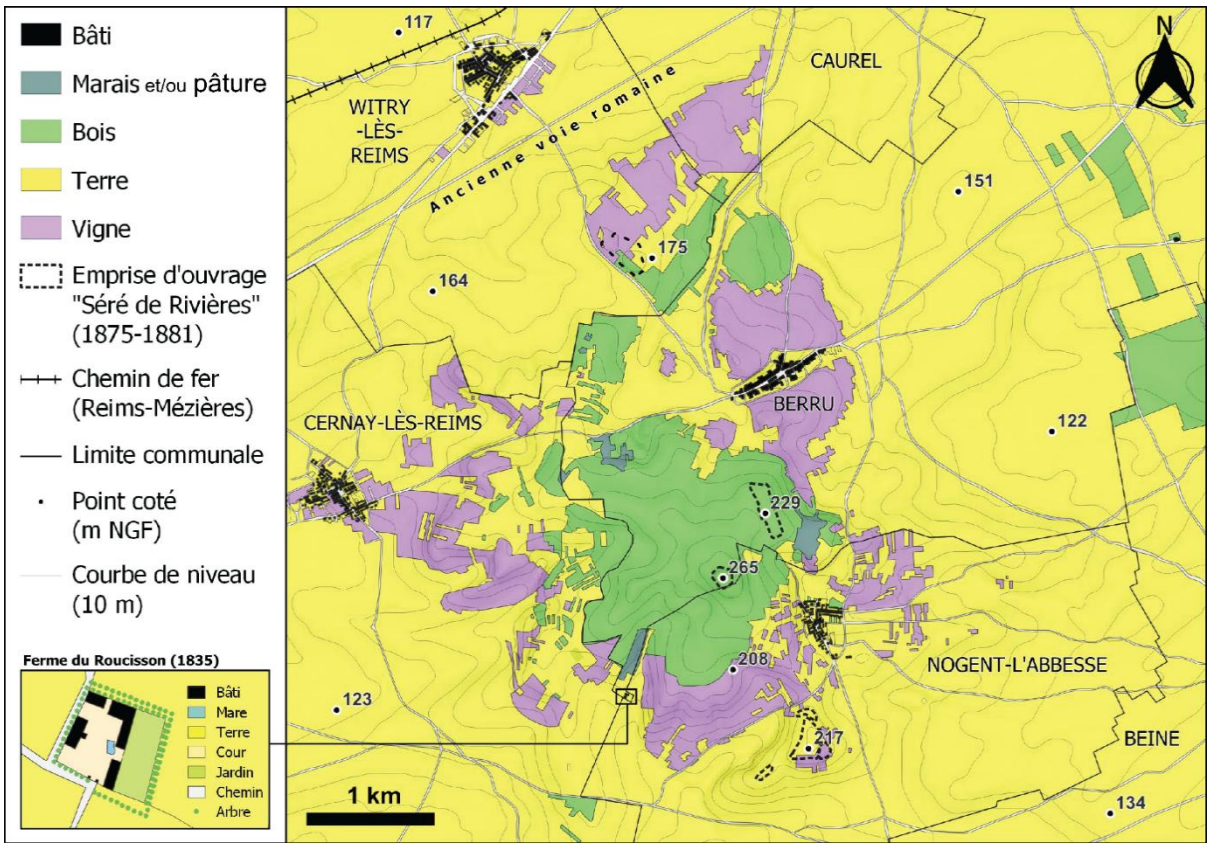


Figure 3.29 : Occupation du sol de la butte de Berru autour de 1830 (d'après la carte d'État-Major).

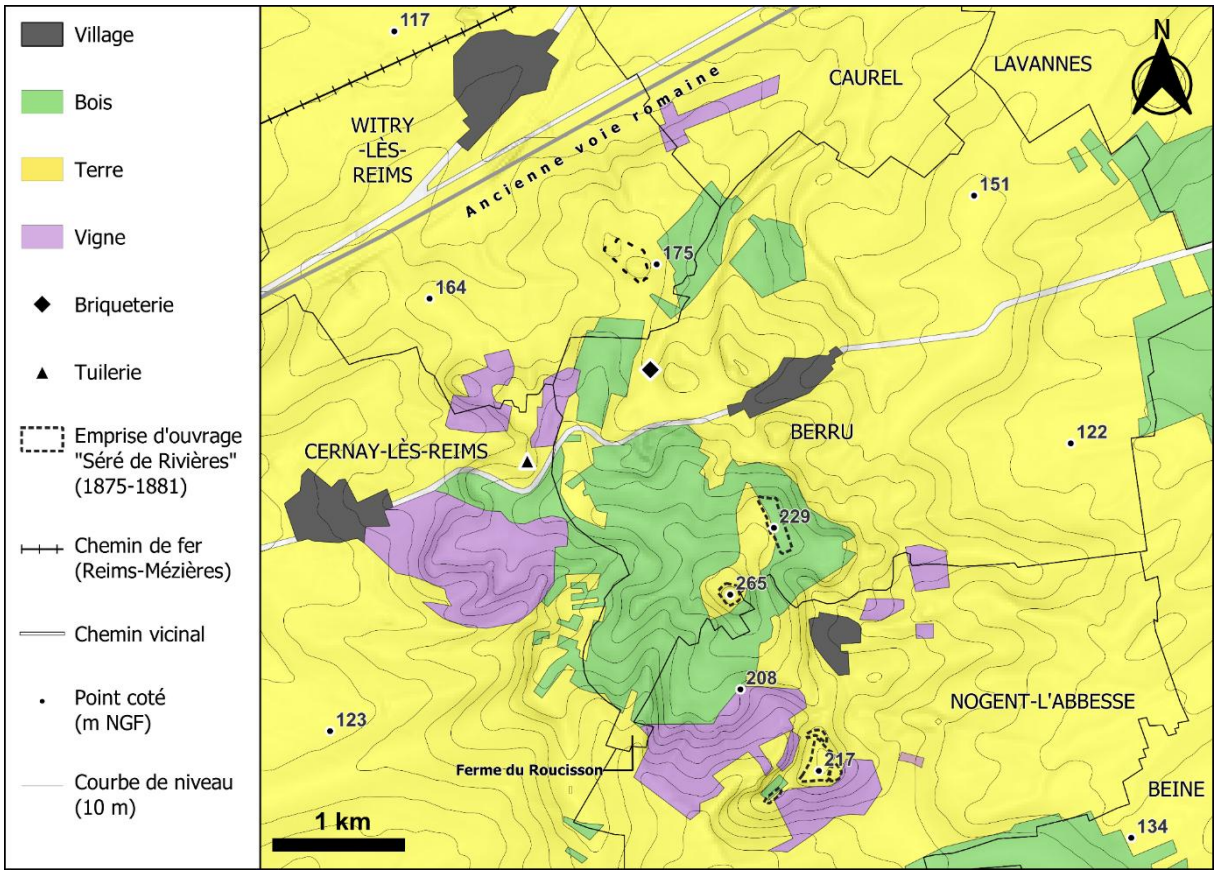


Figure 3.30 : Occupation du sol de la butte de Berru dans les années 1870 (d'après l'atlas départemental des Ponts et chaussées et services vicinaux).

Dès le XVIIIe siècle, les vignobles sont destinés, jusqu'au début du XXe siècle, à la production de vins de terroir (blancs et rouges) qui étaient consommés près des lieux de production. Ils s'organisent en quatre ensembles disposés sur le pourtour de la butte (Quantinet, 2024) :

- sur les côteaux occidentaux, le vignoble de Cernay-lès-Reims atteignant son apogée au XVIIIe siècle (150 ha) ;

- sur les coteaux septentrionaux, répartis sur les finages de Witry-lès-Reims (61 ha) et Caurel (36 ha), connaissant un pic à la fin du même siècle ;

- sur les côtes sud et sud-est, le vignoble de Nogent-l'Abbesse atteignant un premier pic en 1837 (90 ha) ;

- dans la partie nord-ouest, le vignoble de Berru qui atteint son paroxysme en 1773 (163 ha).

En dehors du vignoble de Nogent-l'Abbesse, dont les surfaces restent relativement stables jusqu'à la Première Guerre mondiale (autour de 100 ha), conflit pendant lequel la production champenoise s'arrête presque complètement, le vignoble du Mont de Berru

connaît un effondrement précoce dès la fin du XIXe siècle (fig. 3.30). Ce recul s'inscrit dans un faisceau de facteurs conjoints, associant la crise économique de 1848, l'ouverture accrue à la concurrence permise par le développement du réseau ferroviaire, et, plus tardivement, la crise du phylloxéra (Musset, 2006). L'exploitation des lignites pyriteux, contenues dans les Argiles à lignites, en cendrières, constitue dès les XVIIIe-XIXe siècles un moteur important de la petite industrie locale. Cette filière extractive de cendres, à destination notamment de l'amendement agricole, et le développement de briqueteries et tuileries entre Witry-lès-Reims et Berru, contribuent probablement à la régression précoce des surfaces viticoles sur la commune de Berru ou presqu'aucune parcelle viticole n'est représentée sur les documents cartographiques des années 1870 (fig. 3.30).

Finalement, au moment de la mise en place de la ceinture fortifiée, le site de construction du fort de Nogent-l'Abbesse est entièrement dédié à la culture et à la vigne (annexe 19A-D), de même que le fort de Witry-lès-Reims, lequel est déjà juxtaposé à un bois. À l'inverse, la partie sommitale de la butte de Berru, où sont construits les ouvrages éponymes, est complètement sous forêt, malgré la représentation d'une clairière sur l'atlas départemental, dont le défrichement est en fait concomitant aux travaux (fig. 3.30 ; *cf.* partie 3.2.3.3).

3.2.1.4. Mont de Brimont

Le terroir du Mont de Brimont se répartit entre les communes de Courcy, Loivre et surtout Brimont, seul village directement adossé à la butte (fig. 3.31, 3.32), dont la toponymie rappelle bien ce caractère surélevé prisé lors des affrontements militaires[5]. Au milieu du XVIIIe siècle, la carte de Cassini représente la butte de Brimont dépourvue de couvert forestier, mais partiellement occupée par la vigne sur son versant oriental (*c.* 37 ha dans l'emprise du secteur d'étude). Cette absence de forêt doit être envisagée avec précaution au regard des seuils de non-représentation fréquents des petites surfaces boisées (*c.* 20 ha, exceptionnellement jusqu'à 100 ha ; Vallauri et al., 2012). Elle reste néanmoins cohérente avec la présence figurée de deux boisements d'une vingtaine d'hectares au sud de la butte, alors qu'un massif continu d'environ 120 ha est décrit quelques décennies plus tard.

Povillon-Piérard, dans son *Tableau historique et statistique de la montagne et du village de Brimont*, émaillé d'envolées parfois pittoresques, voire hagiographiques à l'égard du Vicomte Ruinart de Brimont, indique en effet en 1826 que le Mont est couvert de « *bois blancs et sapins* ». Le qualificatif « blanc », qui renvoie ici à un bois de faible valeur économique et de médiocre durabilité (*e.g.*, bouleau, aulne), associé à la mention de conifères probablement introduits, suggère l'existence, au début du XIXe siècle, de

[5] En 1359, le duc de Lancaster occupe par exemple Brimont lors du siège de Reims par les armées du roi d'Angleterre Edouard III, qui souhaite se faire couronner dans la cité des sacres (Moranvillé, 1895 ; Pellus, 2007).

boisements jeunes, peu structurés et relevant d'une phase pionnière ou pré-forestière, consécutive à un changement rapide d'usage des sols. Le texte mentionne par ailleurs que « *M. le Vicomte Ruinart de Brimont a fait depuis douze ans planter en sapins plus de douze arpens de terrain sur le revers septentrional du mont, et a ainsi rendu utile un vaste emplacement qui ne pouvait être empouillé que tous les trois ans en avoine* ».

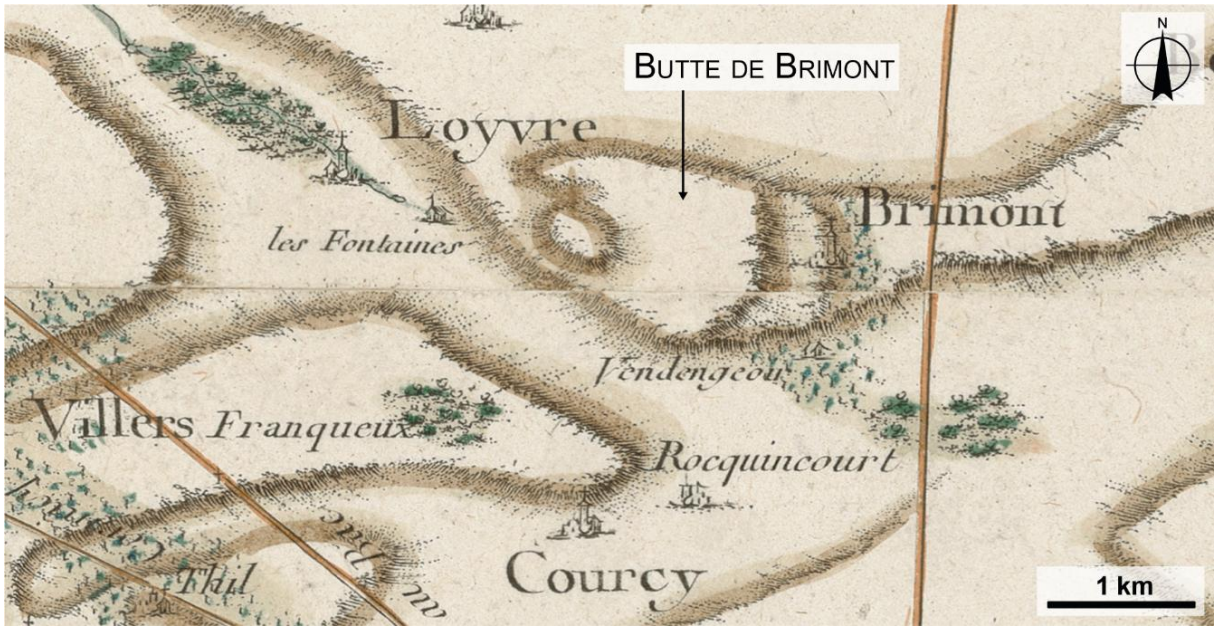


Figure 3.31 : Extrait de la carte de Cassini (feuille de Reims, 1757) représentant le secteur de la butte de Brimont.

En l'occurrence, le cadastre napoléonien, levé sur les trois communes en 1834, soit moins de dix ans plus tard, représente effectivement des parcelles de pins de surface équivalente sur le versant nord de la butte (fig. 3.32). Cela suggère que l'emploi du mot « sapin » puisse désigner toute essence de plantation résineuse utilisée à cette époque. Il est ainsi vraisemblable que les formations sableuses du Thanétien, très drainantes et à faible réserve utile en eau, aient historiquement favorisé la vigne et les cultures peu exigeantes.

À partir du XIXe siècle, la fermeture des espaces sommitaux coïncide avec cette occupation du sol rurale ternaire, devenue typique des paysages de cuesta, déjà observée en Montagne de Reims et sur le Mont de Berru (fig. 3.32). À l'inverse de ces surfaces boisées situées sur les hauteurs, les champs cultivés en openfield sont préférentiellement disposés sur le plateau crayeux. Les parcelles de « terre », globalement parallèles à la pente et laniérées, ce qui traduit l'existence de petites exploitations paysannes (Dion, 1961), mesurent jusqu'à 400 m de long pour quelques mètres de large. Cette tendance est toutefois démentie au sud de la butte, où se trouve un ensemble de parcelles atteignant plus de 5 ha, peut-être issu de l'ancien domaine du château de Brimont.

Entre les deux, le village viticole de Brimont est implanté sur un replat du versant oriental de la butte, culminant entre 140 et 150 m d'altitude, manifestement modelé dans les sables grésifiés thanétiens. Au-delà de la petite ceinture nourricière (jardins et vergers), une deuxième ceinture viticole légèrement diminuée se dessine, dont les parcelles, de dimensions plus restreintes, atteignent 31 ha (fig. 3.32).

Un demi-siècle plus tard, l'atlas départemental des Ponts et Chaussées et des services vicinaux (*cf.* partie 4.2.2.5) met en évidence un recul des surfaces forestières par rapport au cadastre napoléonien de 1834, avec une superficie passant de 173 ha à 138 ha en 1874 (fig. 3.33). Cette régression s'explique en grande partie par la disparition d'un seul tenant de plus de 30 ha situé dans le quart nord-ouest, au sein de la forêt de Courcy. Toutefois, la carte d'État-Major, levée moins de dix ans avant le cadastre, ne figure que 121 ha de couvert forestier en 1825, en omettant précisément ce même massif. Cette discordance entre deux documents presque contemporains révèle probablement moins une dynamique réelle qu'une divergence de conventions cartographiques et de seuils de représentation, et invite donc à considérer avec prudence l'apparent signal de régression forestière sur cette période (fig. 3.33).

En parallèle, le vignoble recule très fortement et ne subsiste plus qu'à l'état de quelques parcelles relictuelles localisées au nord-est du village. Cette déprise viticole s'inscrit dans un contexte de recomposition rapide des usages du sol. Dès 1834, une briqueterie occupe le sommet de la butte, tandis que la voie ferrée Reims-Laon (1857) et le canal de l'Aisne à la Marne (1866) sont implantés au pied du versant sud-ouest. Dans le même temps, de nombreuses carrières à ciel ouvert, exploitant grès et sables, alimentent la construction et le pavement de la voirie rémoise (Povillon-Piérard, 1826), traduisant l'essor précoce de fonctions extractives et industrielles désormais concurrentes des usages agricoles.

Le paysage au moment de la construction est ainsi peu ou prou le même que celui représenté par l'intermédiaire du cadastre napoléonien (fig. 3.32, 3.33) : le fort de Brimont sera construit au droit de la briqueterie, à cheval sur le massif forestier et une clairière sommitale, et ses batteries annexes, sur des croupes, au droit d'espaces agricoles isolés par le village (ouvrage du Cran de Brimont) ou juxtaposé à la forêt (ouvrage de Loivre).

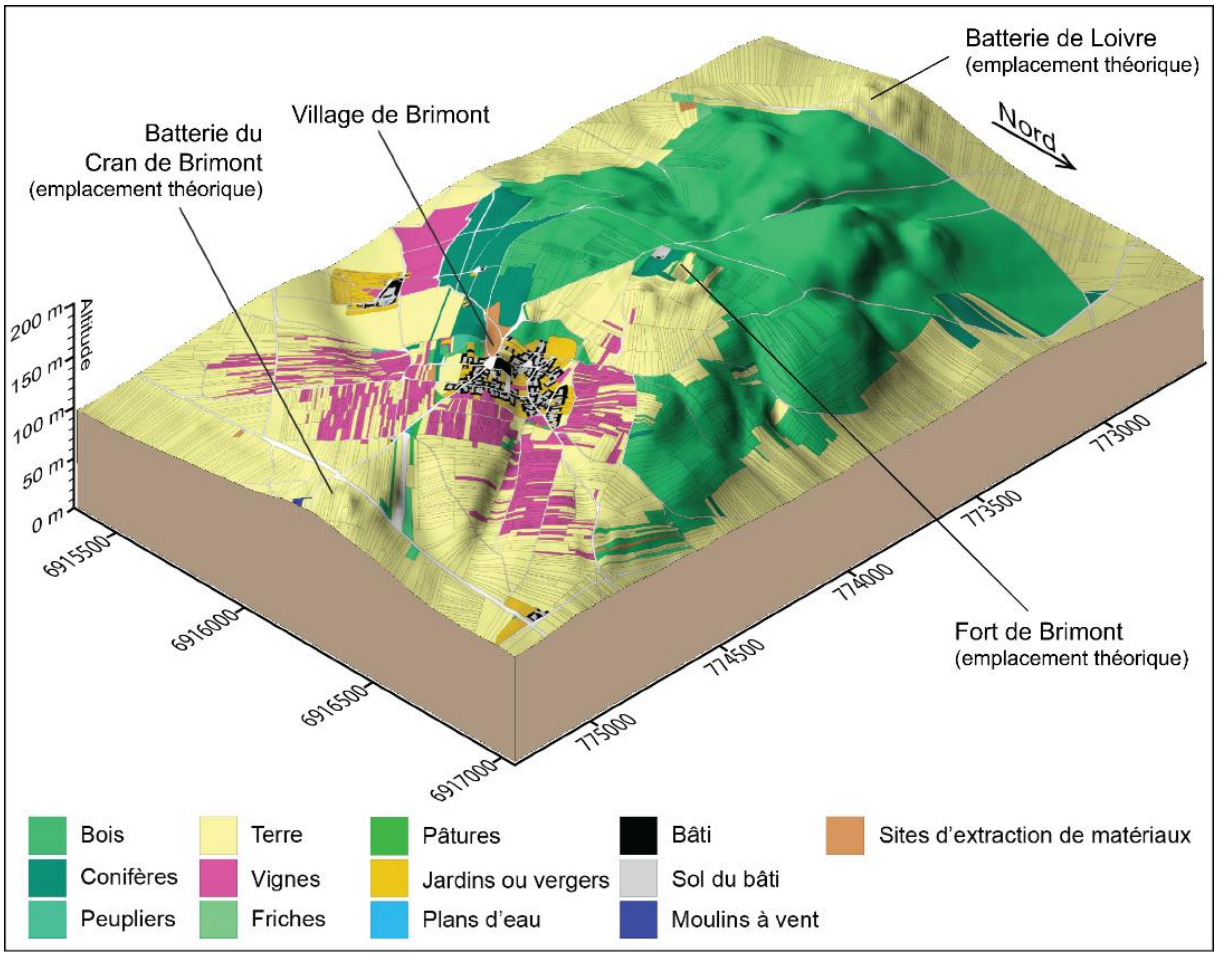


Figure 3.32 : Occupation du sol de la butte de Brimont en 1834 reconstituée d'après le cadastre napoléonien.

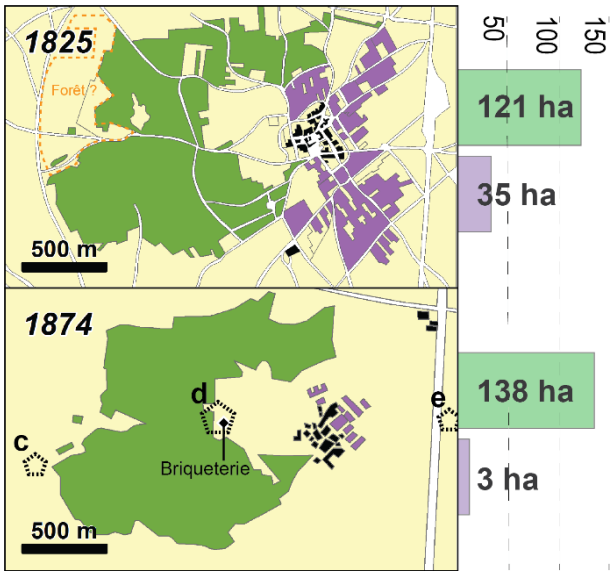


Figure 3.33 : Occupation du sol de la butte de Brimont pendant les années 1830 et 1870, reconstituée d'après la carte d'État-Major et l'atlas départemental des Ponts et chaussées et des services vicinaux (vert : forêt ; beige : culture ; violet : vigne). c : Batterie de Loivre ; d : Fort de Brimont ; e : Batterie du Cran de Brimont.

3.2.1.5. Massif de Saint-Thierry

Le Massif de Saint-Thierry se trouve à l'interface de plusieurs terroirs communaux implantés dans la dépression orthoclinale, au pied de la côte d'Île-de-France. Le village de Villers-Franqueux, au nord, est établi sur les sables thanétiens de Châlons-sur-Vesle, tandis que les villages de Pouillon à l'est, Merfy au sud-est et Chenay au sud s'étendent sur les argiles sus-jacentes de l'Yprésien inférieur (Sparnacien ; fig. 3.2B, 3.5, 3.34A-B). La partie nord-ouest du massif, aujourd'hui rattachée à Hermonville, semble relever du domaine du château de Toussicourt avant la Révolution française, comme l'indique un plan terrier de 1777 (annexe 20A-D, 21). Cet habitat isolé, implanté sur un petit replat développé dans les sables cuisiens, dont des traces morphologiques sont encore lisibles dans les données LiDAR (annexe 20D), perdure au cours du XIXe siècle au moins jusqu'à la Première Guerre mondiale (annexe 20B-C).

Dans ce secteur, la toponymie des communes révèle la diversité des origines de peuplement, entre héritages gallo-romains renvoyant à d'anciens domaines ruraux antiques (Merfy, Pouillon), fondations franques (Villers-Franqueux) et ancrage chrétien autour de Saint-Thierry, issu de la création de l'abbaye éponyme. Bien que situé en marge du secteur d'étude, ce dernier, né d'un ermitage fondé par Thierry vers l'an 500, exerce dès le Moyen Âge une influence déterminante sur la mise en valeur du massif forestier et du relief qui portent son nom, structurant durablement les dynamiques socio-économiques locales (Demailly-Meneur, 1991).

Trois grands traits paysagers se dégagent également de l'analyse microtoponymique (Demailly-Meneur, 1991). Les noms de lieux traduisent d'abord un paysage de colline[6], ce qui coïncide avec l'usage ancien du terme « Montagne » pour qualifier ce relief. Sans atteindre le sommet de l'interfluve, plusieurs talwegs et petits monts (dont le mont d'Or, sur lequel est fondé l'ermitage primitif) rompent en effet l'atonie relative en avant de la côte d'Île-de-France (fig. 3.34A). La microtoponymie reflète par ailleurs un paysage historiquement forestier, en particulier à travers les références à certaines espèces hygrophiles (saule, aulne, *etc.*), au tilleul (Thill) et surtout au chêne (Chenay, Mont-Chenois, de *castenum*)[7]. Cet état boisé ancien est corroboré par des sources textuelles, notamment les chroniques de Flodoard (Xe siècle), qui mentionnent un *« petit bois situé sur une montagne »*, ainsi que par Paul Bailly, qui rapporte dans La Vie et les miracles de Saint-Thierry (1623)

[6] Au moins 5 % des microtoponymes de l'ensemble des communes, à l'exception de Pouillon, sont directement liés à la topographie (Demailly-Meneur, 1991).

[7] Cette essence arborée apparaît notamment sur les armes de l'abbaye de Saint-Thierry, où un chêne de sinople est placé au centre d'un écusson de gueules chargé d'un aigle d'argent (Demailly-Meneur, 1991).

que Saint-Thierry et l'abbesse Suzanne ne « *trouvèrent au-dessus que des chesnes* » lors de leur visite (Demailly-Meneur, 1991).

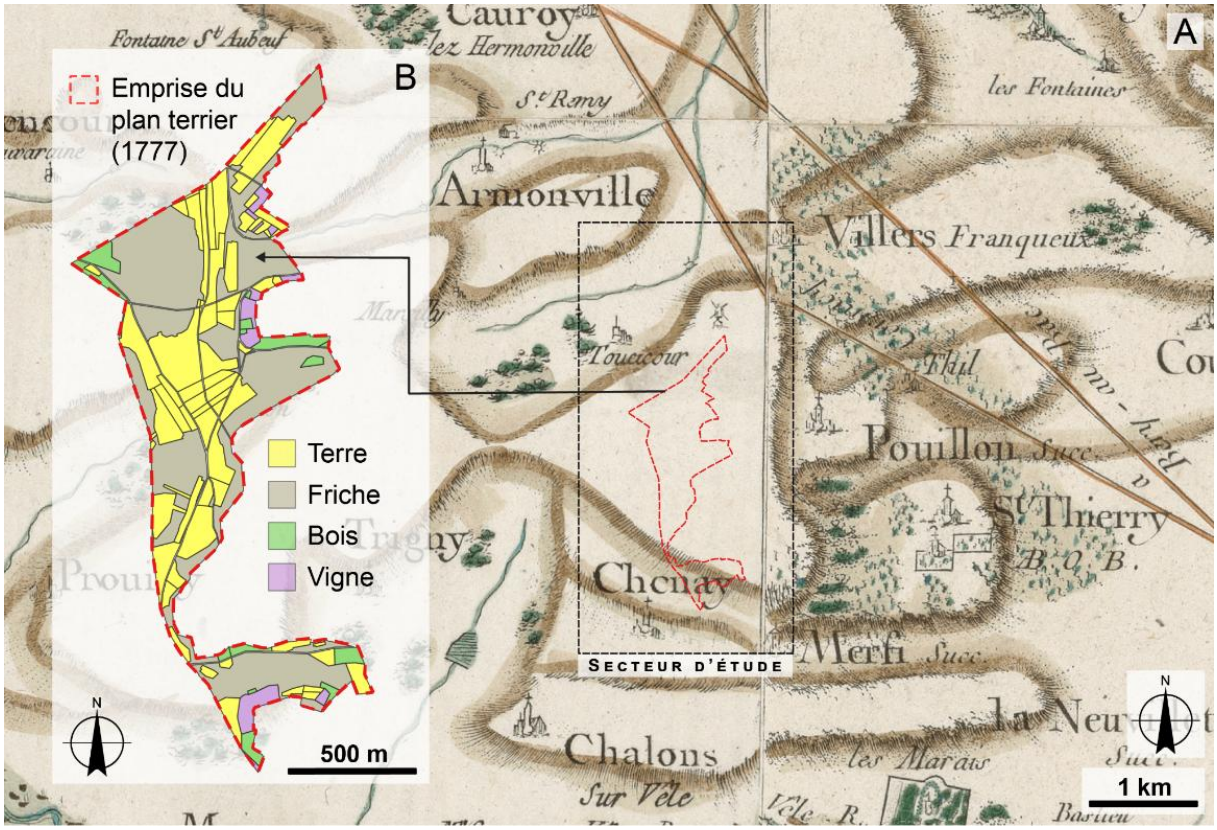


Figure 3.34 : Occupation du sol du Massif de Saint-Thierry après 1750. A : Extrait de la carte de Cassini (feuilles de Soissons, 1750, et Reims, 1757) ; B : Occupation d'une partie de l'interfluve d'après un plan terrier de 1777 (annexe 21).

Toutefois, le plan terrier couvrant la moitié orientale du plateau sommital suggère un relief en grande partie défriché à la fin des Temps modernes, ce qui est corroboré par la carte de Cassini (fig. 3.34A-B, annexe 21). L'espace y apparaît majoritairement dévolu aux terres agricoles et aux friches, jouant probablement le rôle de pâtis collectif, ponctué de petits bosquets et de quelques parcelles viticoles organisées sur le versant (fig. 3.34B). La forêt, dont seuls 6 ha sont représentés dans l'emprise du secteur d'étude, se concentre alors principalement entre Pouillon et Merfy. Tandis que les vignes de Pouillon s'organisent plus bas sur le plateau, celles de Merfy et de Villers-Franqueux se développent préférentiellement sur la côte d'Île-de-France.

Cette occupation agricole du plateau sommital apparaît cohérente avec les conditions environnementales. Elle s'explique en grande partie par le développement de sols sur les calcaires grossiers du Lutétien inférieur et moyen, qui constituent la surface structurale du plateau (fig. 3.2B, 3.5 ; *cf.* partie 3.1.2.3). Très calcaires, biodétritiques et pauvres en fraction fine, ces formations donnent naissance à des sols minces mais bien drainés, portants et non

hydromorphes, globalement favorables aux cultures extensives de céréales, malgré une réserve utile en eau limitée (Laurain, 1986).

Enfin, la microtoponymie révèle l'existence de paysages marécageux, déjà suggérés par les toponymes associés à des essences arborées hygrophiles. L'imperméabilité des argiles de l'Yprésien inférieur, ou des marnes du Thanétien moyen, conditionne en effet le développement de ces prairies palustres de fond de vallon, ou de replats humides dans les talus, aujourd'hui inventoriés voire protégés pour leur valeur écologique (*cf.* partie 3.1.5.2.2). Elles se trouvent notamment sur les communes de Chenay et de Trigny (marais du Vivier ou Grand Marais), mais aussi à Pouillon et Hermonville, bien représentées sur la carte d'État-Major (fig. 3.35).

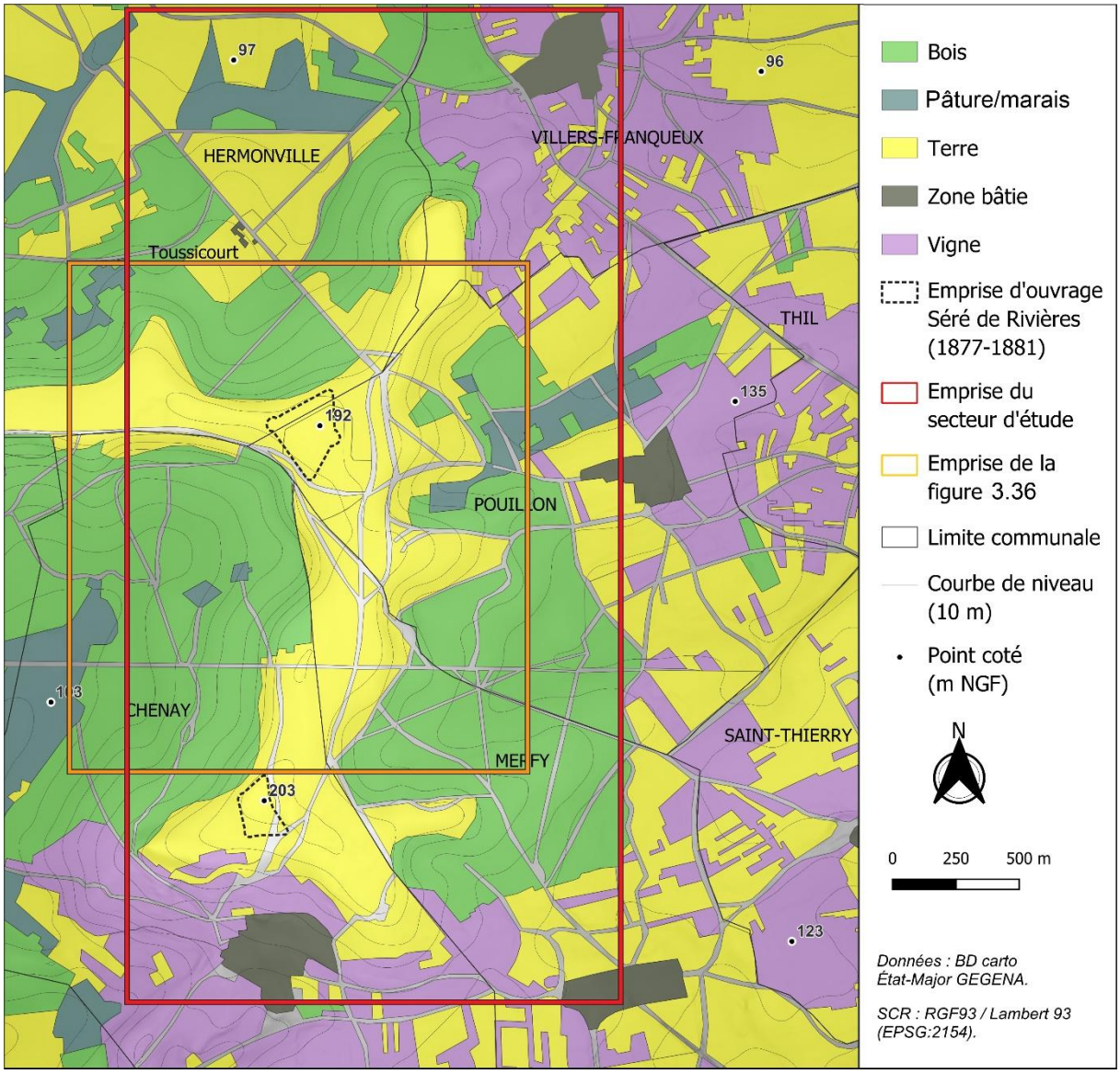


Figure 3.35 : Occupation du sol du Massif de Saint-Thierry dans les années 1830 (d'après la carte d'État-Major).

L'ouverture sommitale de la « Montagne » de Saint-Thierry persiste au début du XIXe siècle (fig. 3.35). En plus d'une vocation agro-pastorale, les sommets revêtent une vocation extractive de calcaires démontrée par la représentation d'environ 20 ha de carrières sur la carte d'État-Major, qui semble donc avoir débuté au tournant des XVIIIe (fig. 3.34B) et XIXe siècles (fig. 3.36, 3.37). En parallèle, une dynamique de boisement affecte la majorité des versants, portant la surface forestière totale à 296 ha. Ce processus est particulièrement marqué en amont du vallon de Trigny, dont toute la partie orientale est forestière, tandis que la partie occidentale est occupée par le village et son vignoble, non visibles dans l'emprise des cartes. À l'inverse, les coteaux de Merfy (sud-est) et de Villers-Franqueux (nord-est) restent majoritairement en vigne, et le vignoble connaît un fort développement dans le terroir de Chenay (sud), pour atteindre 106 ha à l'échelle du secteur d'étude.

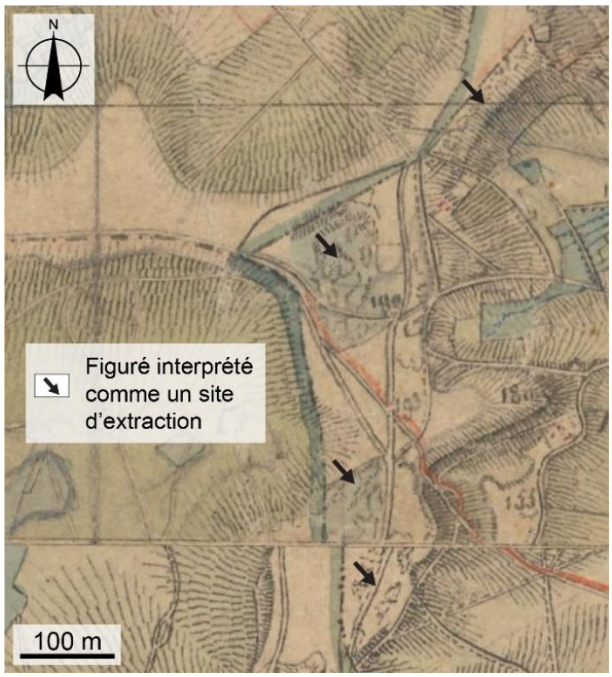


Figure 3.36 : Carrières du Massif de Saint-Thierry représentées sur la carte d'État-Major.

L'organisation paysagère est donc inversée par rapport au Monts de Berru et de Brimont. Elle l'est également vis à vis des paysages de cuesta retrouvés plus à l'est du Bassin parisien (côtes de Meuse et de Moselle), où la couche calcaire sommitale, associée à des sols très minces, très drainants et une forte contrainte hydrique, héberge de vastes massifs forestiers avec des cultures se cantonnant aux dépressions orthoclinales.

À la fin du siècle, la surface boisée augmente encore par la fermeture progressive des sommets, notamment dans la partie nord de l'interfluve, sur les hauteurs de Villers-Franqueux, Hermonville et Pouillon, où le fort de Saint-Thierry sera construit, pour atteindre près de 420 ha. En revanche, aucun bois n'est représenté sur la partie sud, où sera placé le réduit de Chenay (fig. 3.35, 3.37). Comme dans le reste du Pays rémois, la surface viticole chute parallèlement, en particulier par la quasi-disparition du vignoble de Chenay, pour ne plus représenter que 64 ha.

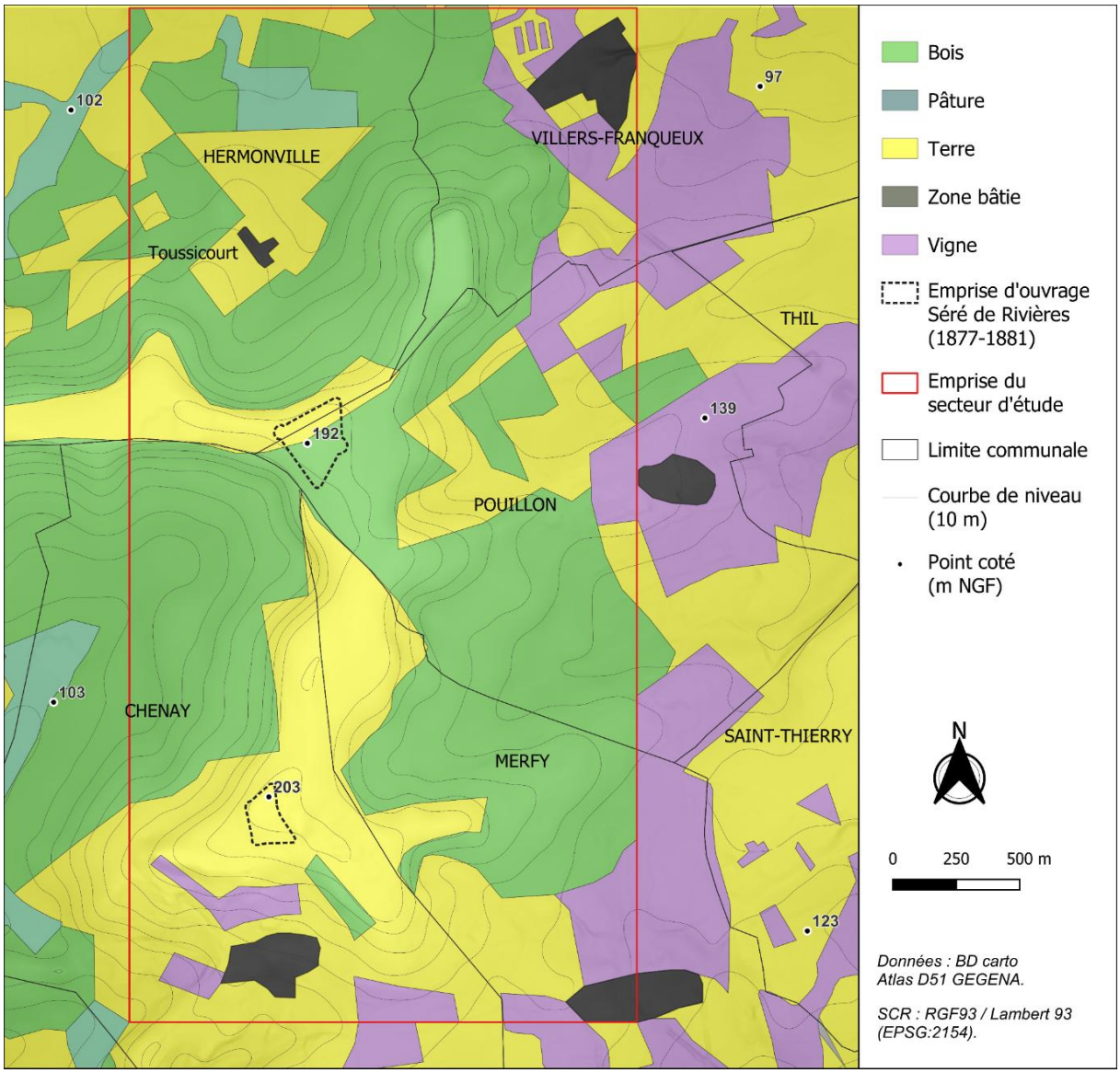


Figure 3.37 : Occupation du sol du Massif de Saint-Thierry pendant les années 1870, reconstituée d'après l'atlas départemental des Ponts et chaussées et des services vicinaux.

3.2.1.6. Synthèse du cadre paysager initial

À la veille de la mise en place de la ceinture fortifiée de Reims, le Pays rémois présente encore l'armature d'un paysage largement structuré par un agro-sylvosystème paysan, fondé sur la céréaliculture de plateau, la viticulture de versant et l'élevage extensif associé aux pâtis et aux prairies humides.

Toutefois, ce cadre paysager traditionnel est déjà profondément affecté par les dynamiques de la première révolution industrielle (1815-1850), vis-à-vis desquelles se déroulent, en miroir, la déprise agricole et les premières formes d'exode rural. Le développement de la petite industrie, qui va de pair avec la rétractation et la spécialisation progressive des terroirs viticoles, traduisent l'entrée du territoire dans une phase de recomposition accélérée de ses usages du sol, se traduisant notamment par la fermeture des espaces sommitaux.

C'est précisément dans ce contexte de transition, marqué à la fois par la persistance de logiques rurales anciennes et par l'irruption de nouvelles contraintes socio-économiques et techniques, que s'inscrit la mise en place du système Séré de Rivières, dans un contexte géopolitique par ailleurs particulier (*cf.* parties 2.2 et 2.3).

Au moment de la construction, certains sites sont complètement voués à l'agriculture et dans une moindre mesure, à la viticulture, étant alors complètement isolés au milieu des champs (forts de Montbré, La Pompelle, Nogent-l'Abbesse, Fresne, réduit de Chenay) ou juxtaposés à une surface boisée (fort de Witry-lès-Reims, batterie de Loivre). À l'inverse, les autres sites sont entièrement sous forêt (vigie et batterie de Berru) ou partiellement, se retrouvant alors initialement en position de lisière forestière (forts de Brimont et de Saint-Thierry).

En revanche, tous bénéficient du développement des infrastructures de transport, notamment ferroviaires (fig. 3.25, 3.26 ; annexe 22 ; *cf.* partie 2.2.3), ainsi que de l'essor des activités extractives, mis en évidence par l'atlas de Poinsignon en Montagne de Reims et dans le Massif de Saint-Thierry (fig. 3.38).

Ces éléments soulignent que la mise en place de la ceinture fortifiée intervient dans un territoire déjà en recomposition, dont les dynamiques d'occupation du sol, d'accessibilité et d'exploitation des ressources conditionnent partiellement l'implantation des ouvrages. Il convient désormais de replacer ce cadre territorial dans une trajectoire militaire plus longue, afin d'appréhender les fondements historiques de la création de la ceinture fortifiée.

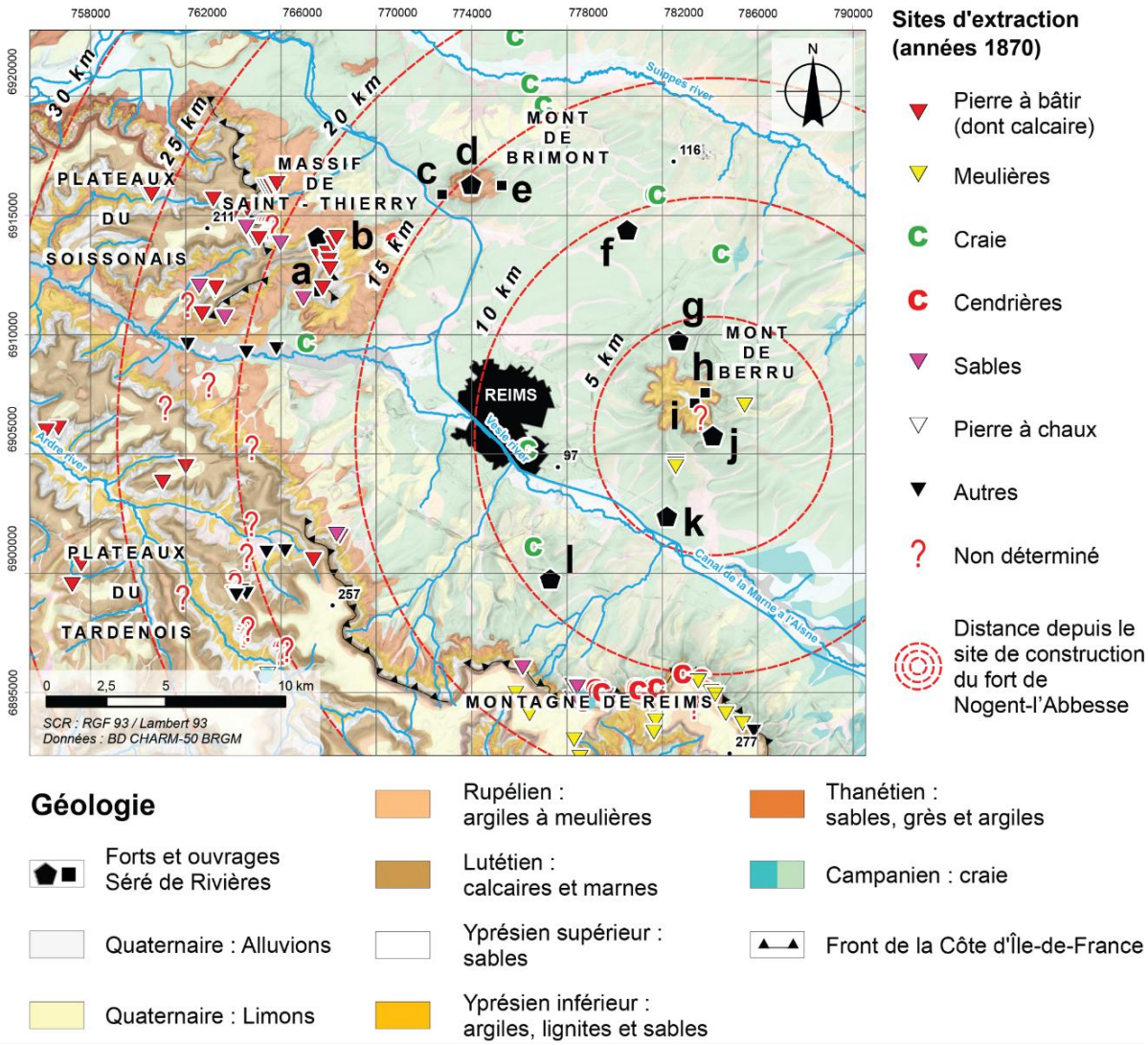


Figure 3.38 : Inventaire des sites d'extraction indiqué dans l'atlas de Poinsignon (années 1870).

3.2.2. Contextualisation historique pré Séré de Rivières

Après avoir abordé la problématique de l'occupation du sol, cette section vise à restituer les grandes lignes de l'histoire militaire régionale. Elle s'attache d'abord à identifier les principaux épisodes conflictuels depuis l'Antiquité, qu'il s'agisse d'invasions, d'incursions liées aux grandes migrations ou de conflits interétatiques, et à analyser les dispositifs défensifs qu'ils ont suscités, en mettant l'accent sur leurs effets morphogènes. Une attention particulière est ensuite portée au XIXe siècle, marqué par deux conflits majeurs mettant à l'épreuve les armées françaises et leurs systèmes de fortification (*cf.* parties 2.1.2 et 2.2.1). Ces événements soulignent la nécessité d'une organisation défensive en profondeur et interrogent la pertinence de la constitution d'une place forte à Reims.

3.2.2.1. Histoire militaire régionale anté-XIXe

L'histoire du Pays de Reims, et plus largement, de la Champagne, est marquée par une récurrence des conflits armés et des épisodes de mise en défense, liée à une combinaison de facteurs géographiques et politiques.

La Champagne tire son avantage géographique du fait de sa position d'interface au cœur des grands axes de circulation européens, reliant sans obstacle majeur le nord marchand et industriel de l'Europe aux pôles méditerranéens et italiens (Munro, 2000). À l'échelle locale, le site de Reims constitue un point nodal de cette interface, installé en marge des plateaux tertiaires, dans une cuvette topographique contrôlant la percée cataclinale de la Vesle et concentrant les circulations régionales (fig. 3.2B ; annexe 14 ; *cf.* partie 3.1.1). À cela s'ajoute le caractère symbolique et politique de Reims, qui devient progressivement la ville des sacres et un centre urbain de premier plan à forte valeur stratégique.
Cette section s'intéresse aux traces géomorphologiques associées à ces conflits, en interrogeant la place des structures défensives, lesquelles constituent théoriquement la principale catégorie de traces de conflits des époques préindustrielles (Hesse, 2014). En plus d'inscrire la ceinture Séré de Rivières de Reims dans le temps long de l'histoire régionale des fortifications, elle permet par ailleurs de saisir l'évolution de l'impact morphogène de la militarisation et de la guerre et donc de relativiser les résultats obtenus.

Dès l'Antiquité, les caractéristiques topologiques de la Gaule, notamment présentées sur la Table de Peutinger, font de l'agglomération antique de *Durocortorum* (Reims) un carrefour majeur propice aux manœuvres militaires (Devos, 2022). Lors de la conquête romaine, le site urbain est occupé par un oppidum gaulois protégé par une fortification de 50 m de largeur, composée d'un fossé et d'une levée probablement augmentée d'une palissade (fig. 3.39). L'enceinte est supprimée par les Romains après leur conquête de la Gaule. La ville devient alors la capitale de la Gaule belgique au Ier siècle, accueillant un gouverneur romain, et se dote de fait d'une nouvelle enceinte dite « Augustéenne » (Haut-Empire).

Pendant le Bas-Empire (IVe siècle), une nouvelle enceinte est enfin constituée en parallèle d'un contexte d'affaiblissement du pouvoir romain, la ville passant vraisemblablement du statut de place d'arme à celui de centre logistique et de base arrière des armées romaines portées vers le *limes* germanique nord-oriental (Delaunay, 1980).

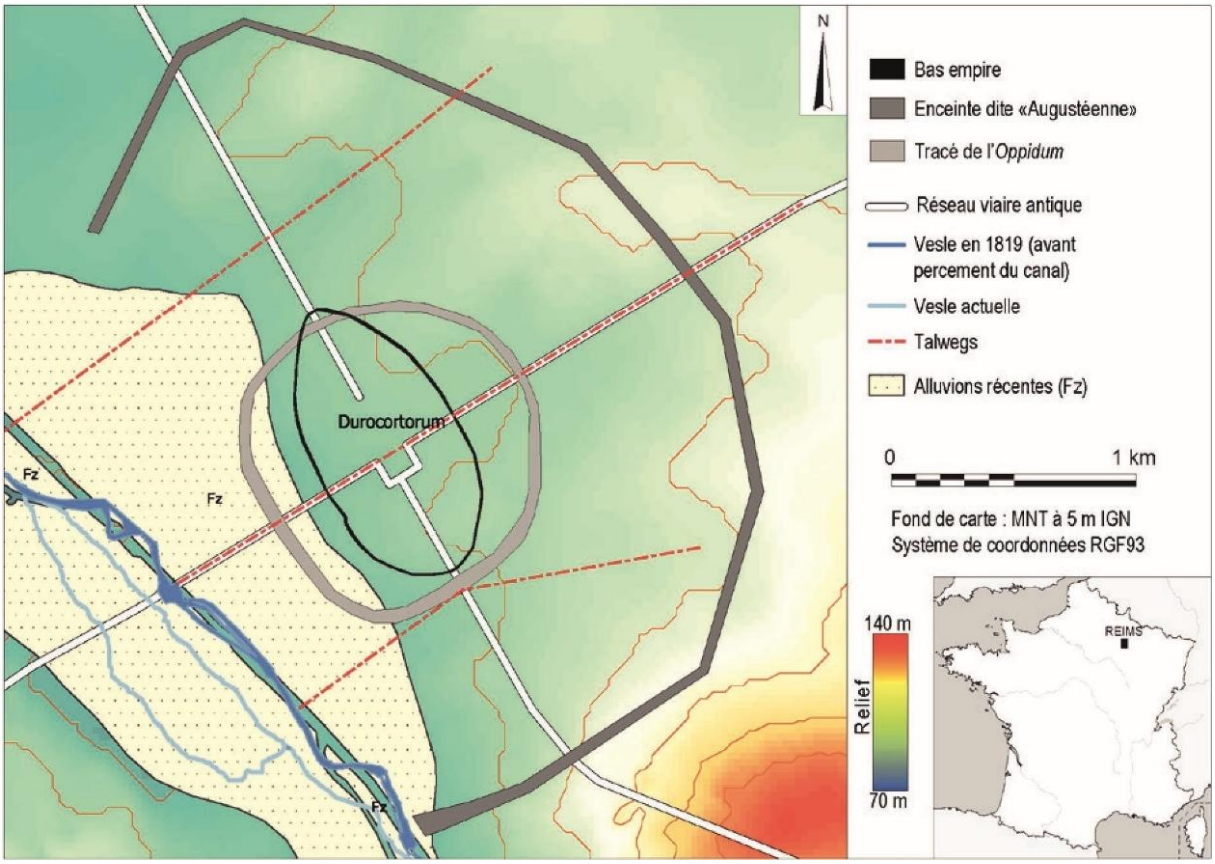


Figure 3.39 : Enceintes antiques et topographie de *Durocortorum* (Laratte, 2022b ; modifié d'après Pichard, 2014).

La fin de l'Antiquité et le haut Moyen-Âge sont marqués par une succession d'incursions et d'invasions liées aux recompositions politiques de l'Europe occidentale. Alamans et Francs au IIIe siècle, Vandales, Suèves et Alains au début du Ve siècle, Huns au milieu de ce même siècle, puis Normands au IXe siècle, traversent ou affectent durablement la région, entraînant des destructions et des phases de fortification ponctuelles.

Ces épisodes, bien documentés par les sources historiques (Le Pauvremoyne, 1957 ; Delaunay, 1980 ; Kristo, 2000), traduisent une conflictualité intense aboutissant à des aménagements défensifs rarement pérennes. Les dispositifs qui perdurent sont essentiellement concentrés sur l'espace urbain, sous forme d'enceintes successives adaptées aux contextes politiques et techniques du moment (fig. 3.39, fig. 3.40A-B). En revanche, les reliefs périphériques, pourtant occupés ponctuellement par les habitants cherchant protection ou par des armées, ne font pas l'objet d'une fortification durable aujourd'hui documentée.

Ces logiques se retrouvent au cours du Moyen-Âge et de l'Époque moderne. Le siège de Reims par Édouard III en 1359 illustre de manière emblématique cette dissociation entre occupation militaire des reliefs environnants et persistance des formes fortifiées. Les armées anglaises établissent leurs quartiers sur plusieurs communes périphériques, souvent en lien avec des positions topographiquement favorables (*e.g.*, Brimont, Cernay-lès-Reims, Verzy, abbaye de Saint-Thierry), sans que ces occupations temporaires ne donnent lieu à des aménagements défensifs inscrits dans la durée (Moranvillé, 1895 ; Pellus, 2007). En revanche, la cité est protégée par une enceinte édifiée au XIVe siècle dans le contexte de la guerre de Cent Ans, qui constitue un vaste système défensif maçonné à fossés et tours (fig. 3.40A-B). De même, lors de la guerre de Trente Ans, la Champagne, en tant que marche du Royaume de France, constitue dès le début du conflit une zone de passage et une base arrière majeure pour les opérations menées plus à l'est (Bourquin, 1994).

La région connaît en moyenne onze passages de troupes par an, pour un total estimé à 273, accompagnés d'exactions massives contre les populations civiles et de destructions généralisées, conduisant à l'incendie d'au moins un village sur deux et à une division par deux de la population régionale (Stévenin, 1996). Malgré l'intensité de cette conflictualité, les traces matérielles durables demeurent rares et se concentrent essentiellement sur les villes fortifiées et leurs enceintes.

Ainsi, jusqu'à la fin du XVIIIe siècle, la région rémoise se caractérise par une exposition répétée aux conflits et aux invasions, et une matérialité défensive durable largement cantonnée à l'espace urbain (fig. 3.39, 3.40A-B). Les différentes enceintes de Reims témoignent de logiques de mise en défense centrées sur la ville, destinées à protéger le bâti et la population face à des sièges et à des armements à portée limitée. Ce constat permet de comprendre, à l'échelle du Pays rémois, la rupture spatiale introduite au XIXe siècle par la fortification détachée (*cf.* partie 2.1) et la mise en place de la ceinture Séré de Rivières (*cf.* partie 2.3), qui symbolise le passage d'une défense urbaine à une défense éloignée de l'agglomération agissant à une échelle territoriale plus vaste.

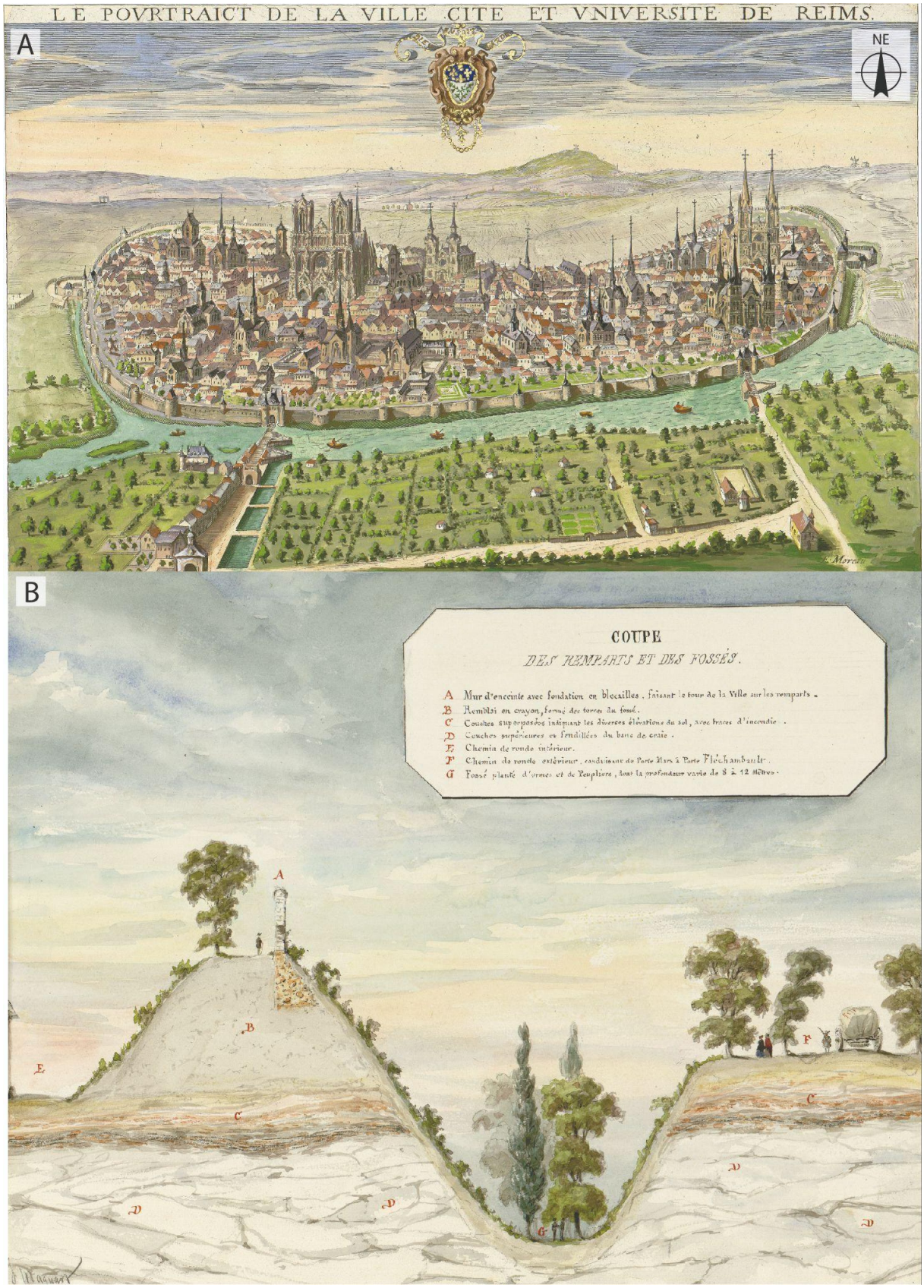


Figure 3.40 : Rempart médiéval de Reims au XIXe siècle (Maquart, 1854). A : Ancien rempart médiéval et portes de Reims par Edmé Moreau ; B : Coupe des remparts et des fossés.

3.2.2.2. Émergence de la valeur stratégique de Reims et de la côte d'Île-de-France

Le XIXe siècle marque une inflexion décisive dans la perception militaire du territoire champenois et du secteur rémois. Les campagnes de 1814 et de 1870, bien que séparées par plus d'un demi-siècle et des contextes politiques distincts, constituent deux expériences fondatrices dans la pensée stratégique française. Elles révèlent les limites des dispositifs défensifs bastionnés, centrés sur la frontière, et mettent en évidence la vulnérabilité du territoire national face à des pénétrations rapides dirigées vers la capitale (Barros, 1999).

Tout d'abord, lors de la campagne de France de 1814, les armées coalisées franchissent la frontière à l'hiver 1813 et occupent rapidement la Champagne. Si la bataille de Reims du 13 mars 1814 se solde par une victoire française, elle demeure exceptionnelle dans une séquence dominée par des engagements défavorables sur la côte d'Île-de-France, notamment à Craonne (7 mars 1814) et à Laon (10 mars 1814), où les forces napoléoniennes échouent à contenir l'avance prussienne menée par Blücher (Boudon, 2013). Ces combats montrent que la rupture du dispositif frontalier entraîne un déplacement rapide du théâtre des opérations vers l'intérieur du territoire, en suivant les grands axes structurés par les vallées et les plateaux sédimentaires. Reims apparaît alors comme un point nodal exposé, situé sur un axe de progression majeur, sans disposer de moyens susceptibles d'infléchir durablement la dynamique de l'invasion (Barros, 1999). Cela incite à l'élaboration d'un premier projet de création de citadelle en 1843, finalement non réalisé (annexes 23, 24), qui intervient alors que toute la face sud-occidentale de l'enceinte médiévale est démolie dans le cadre du creusement du canal de l'Aisne à la Marne (1841-1866 ; Comité des fortifications, 1843).

La guerre franco-prussienne de 1870-1871 confirme et amplifie ces constats. Après la défaite de Sedan, les forces allemandes cherchent à sécuriser les voies de communication menant à Paris, en particulier les axes ferroviaires et routiers traversant la Champagne. La capitulation rapide de plusieurs places jugées insuffisamment préparées, ou mal intégrées à un dispositif d'ensemble, telles que Laon (9 septembre 1870), Soissons (15 octobre 1870) ou La Fère (28 novembre 1870 ; fig. 2.6), met en évidence la faiblesse d'un système défensif discontinu et l'incapacité des places isolées à jouer un rôle de verrou territorial efficace (Barros, 1999). Reims est occupée durablement à la suite du conflit, accueillant une importante garnison allemande jusqu'en 1872, ce qui souligne son importance stratégique et logistique dans le contrôle du Pays rémois (Delaunay, 1980).

Ces deux conflits successifs contribuent à une relecture profonde du territoire par les milieux militaires français (*cf.* parties 2.2.3 et 2.3.1). À l'ère du développement des chemins de fer et de l'accroissement de la mobilité des armées, la défense ne peut plus être pensée

exclusivement à partir de la ligne frontière. Les analyses contemporaines identifient alors la côte d'Île-de-France, comme « *la dernière position militaire que rencontre l'ennemi avant d'arriver devant le grand camp retranché de Paris* » (Marga, 1876). La côte, qui s'étend de Nogent-sur-Seine à Laon, intersecte les principales vallées convergeant vers Paris et concentre de fait les itinéraires militaires potentiels (*cf.* partie 3.1.1).

Toutefois, les géographes et stratèges du XIXe siècle soulignent également les limites défensives de cet espace. La côte d'Île-de-France est décrite comme un obstacle étendu et difficile à défendre dans sa totalité, car offrant des positions de résistance inégales selon les secteurs (Ténot, 1883). En outre, la variabilité de ses paysages sommitaux, influencés par l'hétérogénéité du substrat géologique (*e.g.*, revers de côte argileux ou calcaire au sud et à l'ouest de Reims), contraste avec la plus grande homogénéité des cuestas mésozoïques de l'est du bassin de Paris (Barré, 1899). Sa valeur stratégique repose ainsi sur la combinaison d'obstacles naturels de nature et d'efficacité variables (Marga, 1876), susceptible de créer des effets de barrières associatifs (Amat, 2024) comme par exemple :

- la présence de la vallée de la Seine au sud de la cuesta, parallèle au front de côte entre Montereau-Fault-Yonne et Nogent-sur-Seine, et du marais de Saint-Gond (effet de barrière associatif apposé) ;

- la combinaison du relief de cuesta et de vastes massifs forestiers (*e.g.*, Montagne de Reims ; barrière associative superposée) localement renforcée par les jalons géomorphologiques que représentent les buttes-témoins et avant-buttes essaimant la Champagne.

Dans ce cadre, le secteur rémois occupe une position singulière. Située au centre d'un ensemble de trois vallées cataclinales majeures (fig. 3.2B) et sur un nœud de communication renforcé au XIXe siècle par le développement ferroviaire (fig. 3.26 ; annexe 22), Reims apparaît comme un point de passage stratégique incontournable, mais insuffisamment protégé. Les expériences de 1814 et de 1870 montrent que la ville, bien qu'importante sur les plans logistique et symbolique, ne constitue pas à elle seule un obstacle capable de ralentir ou de canaliser durablement une offensive dirigée vers Paris. Elle s'inscrit ainsi dans une zone perçue comme vulnérable, nécessitant une réflexion à l'échelle régionale plutôt qu'urbaine (Barros, 1999).

Ainsi, sans produire immédiatement de réponse défensive dans l'élaboration de nouvelles fortifications, les guerres du XIXe siècle jouent un rôle déterminant dans la mise en évidence des faiblesses structurelles du dispositif existant basé sur des enceintes urbaines isolées. En révélant le rôle central de la Champagne et de la côte d'Île-de-France comme espace de transit contraint et de seuil stratégique avant Paris, elles posent les termes du problème

militaire auquel la fortification permanente cherchera à répondre dans les décennies suivantes.

3.2.3. Mise en place de la ceinture fortifiée de Reims

Les réflexions militaires, menées entre 1814 et 1874, aboutissent, à l'issue de la défaite franco-prussienne, à une restructuration profonde de l'appareil militaire et défensif français (recrutement, cadres, organisation territoriale ; *cf.* partie 2.2.2 ; Boniface, 2012). Face à la supériorité de l'armée allemande, cette réorganisation se concrétise notamment par l'élaboration du système Séré de Rivières (*cf.* partie 2.3) et par l'adoption du fort détaché de type 1874, dont les principes, formulés dans les mémoires du général Séré de Rivières, alors directeur du Génie, sont notamment formalisés par l'instruction du 9 mai 1874 (fig. 2.18A-B ; *cf.* partie 2.4 ; Truttmann, 2017). Dans cette nouvelle conception de la fortification permanente, l'accélération de la mobilisation et de la concentration des troupes favorise la mise en place de lignes de résistance organisées dans la profondeur du territoire national, ce qui consacre la valeur stratégique de la côte d'Île-de-France, considérée comme le « *dernier obstacle* » avant Paris (Niox, 1881), au centre de laquelle se situe Reims.

Cette sous-partie vise à analyser la mise en place de la ceinture fortifiée de Reims afin de comprendre comment une doctrine défensive conçue à l'échelle nationale s'est traduite concrètement dans le Pays rémois. Cette mise en perspective historique constitue un préalable indispensable à l'analyse LiDAR des fortifications Séré de Rivières, dans la mesure où la construction des ouvrages, puis leurs transformations ultérieures, sont directement conditionnées par des processus anthropiques qui s'inscrivent à une échelle historique.

L'analyse est organisée en trois temps. Elle précise d'abord le cadre institutionnel et décisionnel dans lequel la place de Reims est conçue et arbitrée, afin de situer les logiques qui président à son inscription dans le dispositif de défense en profondeur. Elle examine ensuite la mise en œuvre concrète de la ceinture fortifiée, à travers le phasage de la construction et l'empreinte territoriale du chantier, de manière à éclairer les conditions initiales de production des formes fortifiées. Elle aborde enfin le fonctionnement initial des ouvrages et l'évolution progressive de leur statut tactique et stratégique jusqu'à la Première Guerre mondiale, en vue de comprendre les trajectoires d'usage qui conditionnent leur lecture morphologique actuelle.

3.2.3.1. Reims dans la réorganisation défensive d'après-guerre

L'intégration de Reims dans le système Séré de Rivières s'inscrit dans un contexte institutionnel et décisionnel exceptionnel, directement lié au choc de la défaite de 1870 et aux pertes territoriales et économiques qui en découlent (*cf.* partie 2.2.1). La recomposition des cadres militaires et administratifs traduit la volonté de refonder en profondeur

l'organisation de la défense nationale et de territorialiser plus finement les capacités de mobilisation et de commandement (Boniface, 2012).

3.2.3.1.1. Cadre institutionnel

À partir de 1873, Reims est intégrée à la VIe région militaire, dont le chef-lieu est Châlons-sur-Marne (fig. 2.8A), à laquelle est associé un corps d'armée et un commandement territorial stable, en temps de paix comme en temps de guerre (*cf.* partie 2.2.2). Initialement étendue à la Champagne-Ardenne et à la Lorraine, la région est dédoublée en 1898 avec la création de la XXe région militaire à Nancy, introduisant une organisation plus perpendiculaire à la frontière (fig. 2.8B). Cette évolution tend vers une structuration plus convergente en direction des premières positions théoriques face à l'Empire allemand, telle qu'elle se formalise à la veille de la Grande Guerre (fig. 2.8A).

Par ailleurs, la ville est réintégrée en 1874 dans la zone frontière après en avoir été exclue lors de la rétractation de 1859, opérée à des fins économiques sous l'influence libérale du Second Empire (fig. 2.9 ; Reitel, 1994b). Cette réintégration soumet, de nouveau, à l'approbation stricte de la commission mixte des travaux publics (CMTP) les transformations civiles, en particulier celles affectant les forêts, considérées comme un élément stratégique de la défense, ainsi que les infrastructures de transport (Amat, 1993, 2024). Le cadre législatif et juridique redevient ainsi favorable à la mise en œuvre de procédures d'expropriation et d'occupation temporaire dans le cadre de la construction d'ouvrages militaires.

Le raffermissement de la zone frontière dans le quart nord-est de la France, désormais étendue jusqu'à l'Île-de-France, combiné à la multiplication de régions militaires organisées perpendiculairement à la frontière, traduit ce basculement progressif d'une logique de défense frontalière vers une défense en profondeur.

L'analyse des mentions de Reims dans les procès-verbaux du Comité de défense (CD ; fig. 3.41), puis de son fonctionnement et de son évolution permettent de comprendre la place assignée à Reims dans ce nouveau schéma défensif.

3.2.3.1.2. Cadre décisionnel (Comité de défense)

Le dépouillement de la retranscription des procès-verbaux du Comité de défense (CD) et de la Sous-commission associée (SC), réalisée par Richard (2009), permet de restituer la séquence décisionnelle ayant conduit à l'élaboration de la place de Reims, telle qu'elle se formalise au sein des plus hautes instances militaires de l'État. Cette documentation met en évidence une trajectoire décisionnelle progressive, marquée par des hésitations initiales et des réajustements successifs, au sein de laquelle trois grandes phases peuvent être distinguées (fig. 3.41). Celles-ci s'inscrivent dans les évolutions nationales de la doctrine

défensive observées à la même période (*cf.* partie 2.3.1), tout en présentant des spécificités propres au cas rémois.

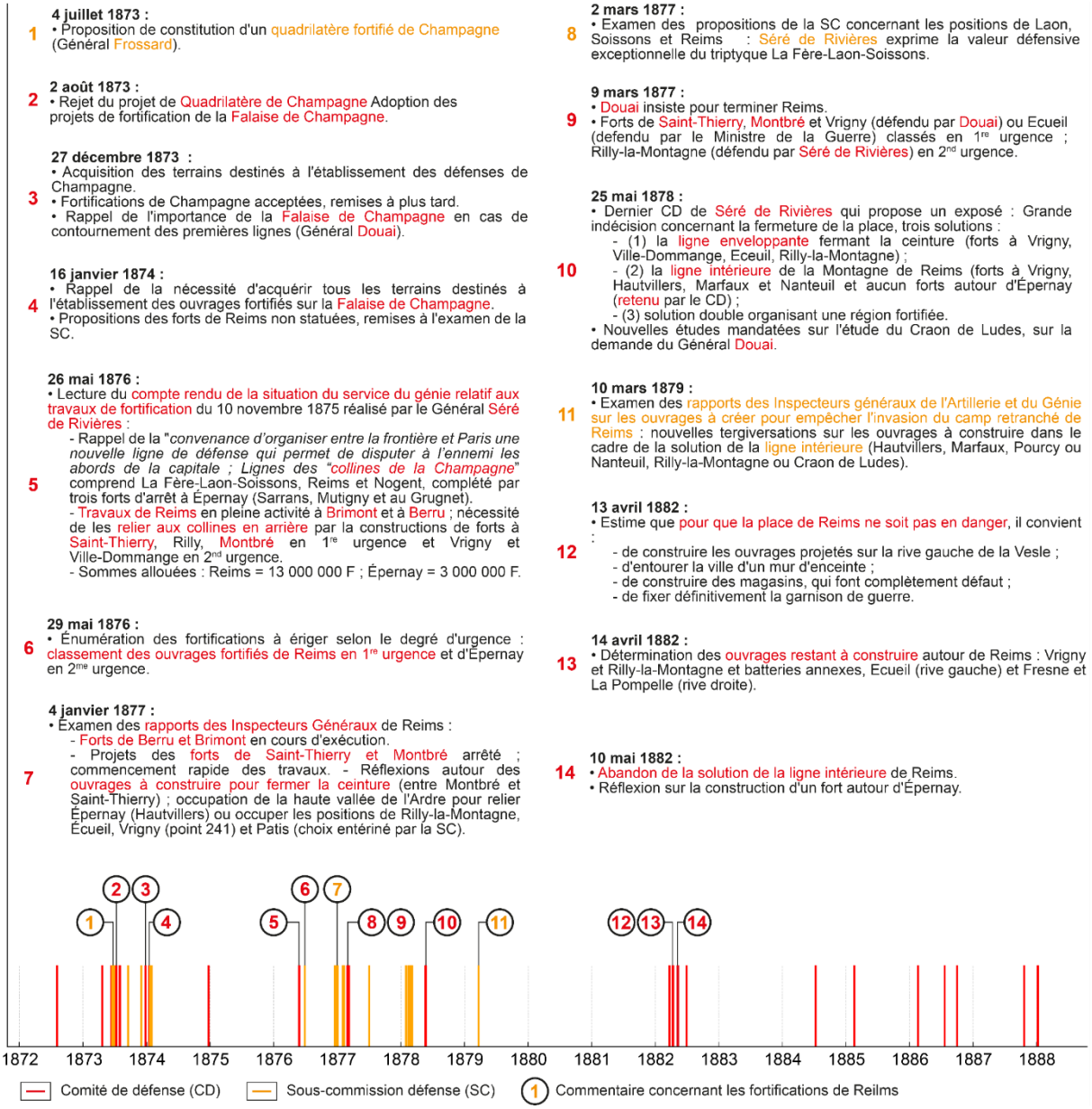


Figure 3.41 : Frise chronologique des séances du Comité de défense (CD) et de la Sous-commission de défense (SC) tenues entre 1872 et 1888, recensées d'après les copies des procès-verbaux (Richard, 2009).

La première phase, comprise entre 1873 et 1876, correspond à une période d'incertitude stratégique au cours de laquelle plusieurs options concurrentes sont envisagées (fig. 3.41). Dès le mois de juillet 1873, le général Frossard défend le projet d'un quadrilatère fortifié de Champagne. Ce dispositif vise à fermer les principaux « défilés » structurés par les vallées cataclinales de la Marne et de la Vesle, par l'établissement de places fortes à Reims, Épernay, Sézanne et Châlons-sur-Marne. Il s'inscrit plus largement dans une logique de verrouillage régional, complétée au nord par le système fortifié La Fère-Laon-Soissons, destiné au

contrôle des vallées de l'Aisne et de l'Oise, et au sud par des forts d'arrêt implantés sur la Seine à Montereau et Nogent-sur-Seine (fig. 3.42).

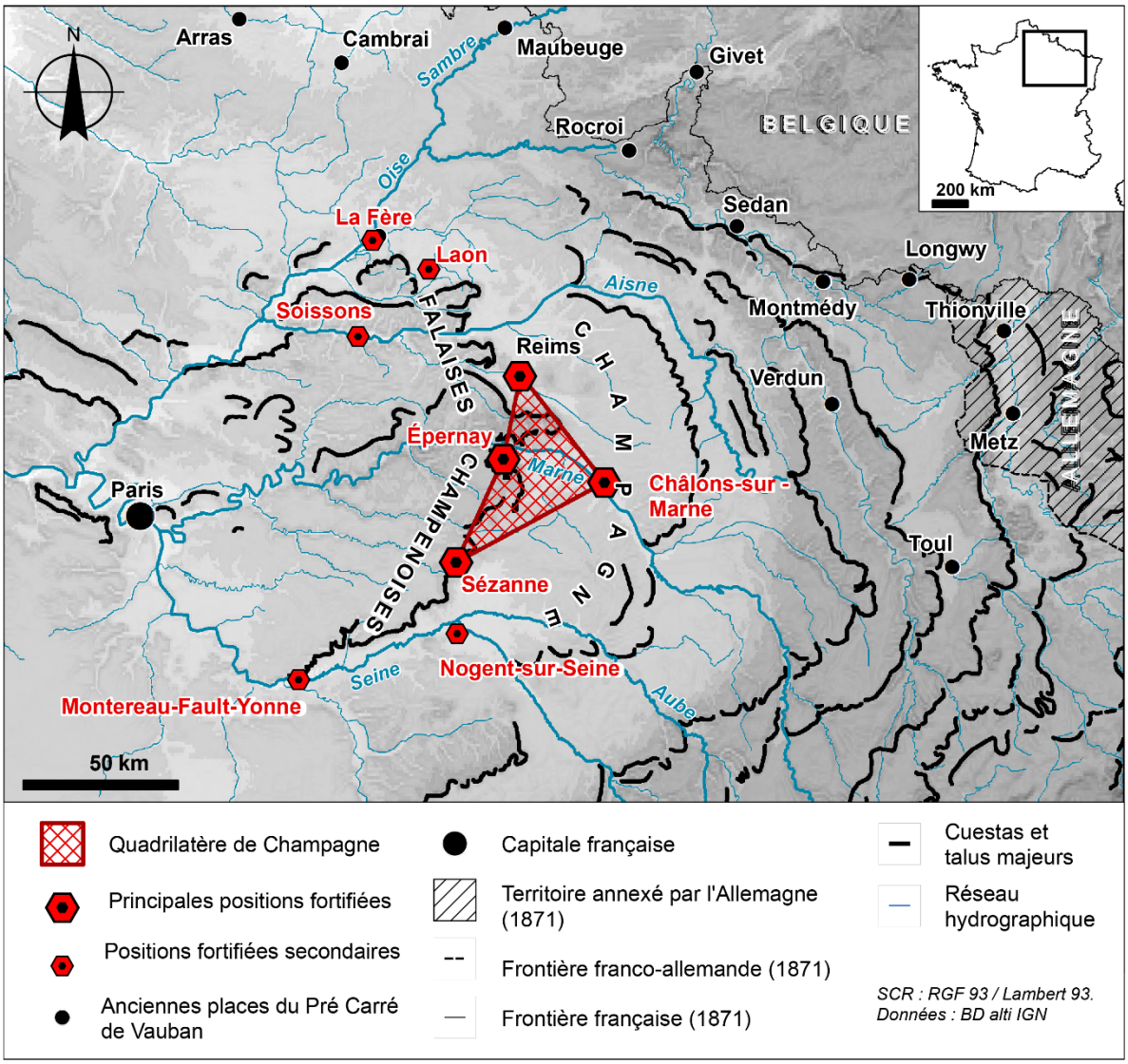


Figure 3.42 : Projet du quadrilatère fortifié de Champagne du général Frossard.

Toutefois, l'hypothèse d'une fortification de Châlons-sur-Marne est rapidement écartée, sa position en contexte de plaine étant jugée défavorable face aux possibilités de contournement. Le CD privilégie alors une solution plus sélective, fondée sur l'implantation des ouvrages sur les hauteurs de la côte d'Île-de-France. Ce principe, qui conserve une partie des places initialement envisagées, dont Reims, est entériné en 1873, tandis que les premières démarches opérationnelles sont engagées entre 1874 et 1875.

La deuxième phase correspond à la période d'activité la plus intense du CD et du Génie dirigés par Séré de Rivières (fig. 3.41). La fortification de Reims est pleinement intégrée aux travaux du Comité, qui privilégie donc une fortification détachée et appuyée sur les reliefs périphériques, afin de contrôler les axes d'approche et d'empêcher l'installation de l'artillerie

ennemie sur les points dominants. Certains ouvrages, jugés prioritaires, sont engagés en urgence sur les deux buttes-témoins de Brimont et Berru qui font face aux positions les plus dangereuses. Les travaux sont notamment lancés en 1875, dans le cadre de l'alerte diplomatique associée au risque d'invasion allemande. Ils concernent également les forts de Montbré et du Massif de Saint-Thierry, répondant à la nécessité de relier ces reliefs avancés aux « *collines en arrière* », expression alors employée pour désigner la côte d'Île-de-France. En parallèle, des réflexions sont engagées sur la Montagne de Reims afin de préciser la configuration à adopter pour la fermeture de la ceinture fortifiée.

La troisième phase, comprise entre 1878 et 1882 (fig. 3.41), s'inscrit dans un contexte de recomposition progressive de l'appareil politico-militaire national, marqué par une remise en cause croissante du rôle du Génie, de la direction exercée par Séré de Rivières et, plus largement, du principe de la fortification permanente, dans un climat doctrinal et sociétal devenu moins favorable (*cf.* parties 2.3.1 et 2.5.3). Les travaux du CD se recentrent alors sur une stabilisation du dispositif rémois, visant à définir une configuration jugée suffisante pour assurer la défense de la ville sans engager de dépenses excessives.

La place de Reims occupe une position centrale dans le discours tenu par Séré de Rivières lors de la séance du 25 mai 1878, qui constitue sa dernière intervention avant le discours à charge du comte de Roys à l'Assemblée et son éviction en 1880. Souhaitant mettre fin à l'indécision, le général expose alors deux solutions de fermeture du dispositif (fig. 3.43A-B) :

- la première, dite de la « *ligne enveloppante* », qui est envisagée dès les premiers instants, ferme effectivement la ceinture fortifiée en s'appuyant sur les contreforts septentrionaux de la Montagne de Reims (Vrigny, Ville-Dommange, Écueil, Rilly-la Montagne) ;

- la seconde, dite de la « *ligne intérieure* », cherche à contrôler l'accès à la vallée de la Marne par l'implantation d'un fort sur les hauteurs d'Épernay, à Hautvillers, complétée par des positions dans la haute vallée de l'Ardre, à Nanteuil et Marfaux, jusqu'à la position de Vrigny, renforçant ainsi le contrôle de la vallée de la Vesle.

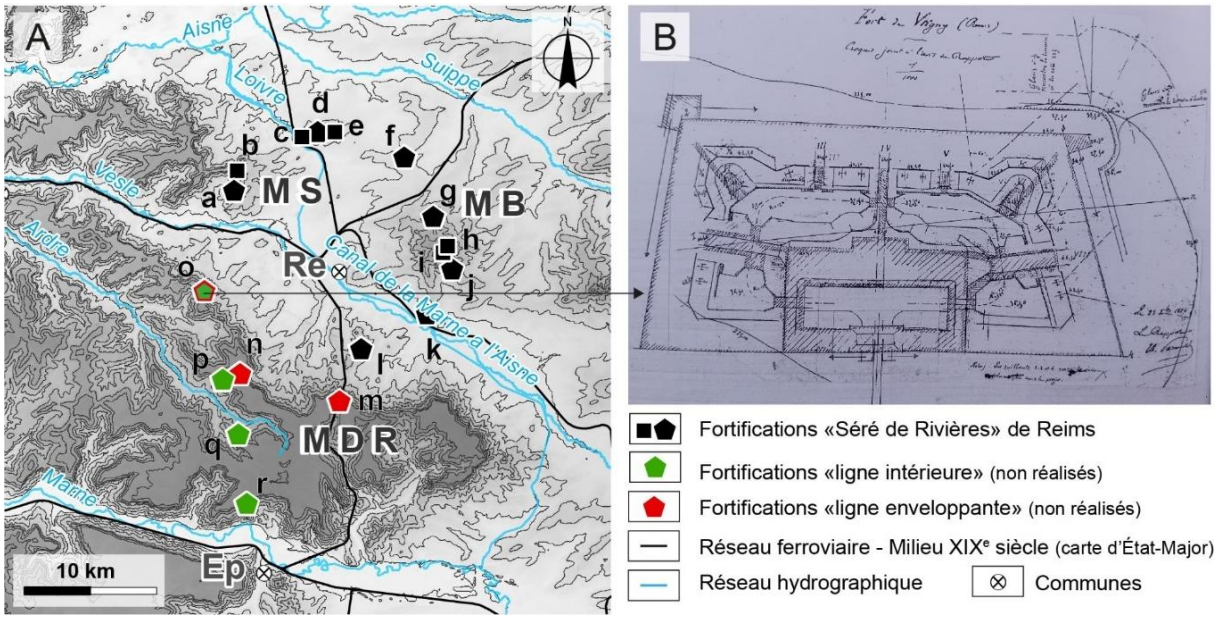


Figure 3.43 : Forts projetés mais non réalisés de la place de Reims. A : Principaux scénarios de fermeture de la place de Reims envisagés par le Comité de défense à la fin des années 1870 ; B : Croquis du fort de Vrigny envisagé en décembre 1884. a : Réduit de Chenay ; b : Fort de Saint-Thierry ; c : Batterie de Loivre ; d : Fort de Brimont ; e : Batterie du Cran de Brimont ; f : Fort de Fresne ; g : Fort de Witry-lès-Reims ; h : Batterie de Berru ; i : Vigie de Berru ; j : Fort de Nogent-L'Abbesse ; k : Fort de la Pompelle ; l : Fort de Montbré ; m : Fort projeté de Rilly-la-Montagne ; n : Fort projeté d'Écueil ; o : Fort projeté de Vrigny ; p : Fort projeté de Marfaux ; r : Fort projeté de Nanteuil ; Fort projeté d'Hautvillers. Ep : Épernay ; Re : Reims.

La solution de la ligne intérieure, soutenue par Séré de Rivières, est initialement retenue, celui-ci considérant le plateau de la Montagne de Reims comme un obstacle naturel favorable à la défense. S'étant personnellement rendu sur le plateau de la Montagne de Reims dans les mois précédents, il en rapporte ainsi une description précise (Richard, 2009) : « *De Hautvillers, je suis allé à Nanteuil et là on est au bord de la lisière de la grande forêt de Reims, peu praticable, au fond marneux et humide, très peu routé, si ce n'est dans le sens perpendiculaire […]* ».

Après les ruptures institutionnelles des années 1879-1880, le CD réexamine une dernière fois le dossier rémois en 1882, dans un contexte de renouvellement partiel de ses membres et de réouverture des crédits. La solution de la ligne enveloppante est alors de nouveau privilégiée et complétée par la création d'ouvrages en rive droite de la Vesle. Ces positions, évoquées tardivement dans les débats, correspondent aux derniers ouvrages effectivement réalisés autour de Reims.

3.2.3.2. Mise en œuvre et phasage de la construction de la ceinture de Reims

Les décisions arrêtées par le CD aboutissent à la construction *ex nihilo*, pour 13,5 millions de francs-or, de sept forts et cinq ouvrages annexes de type 1874, couvrant une surface totale de près de 50 ha, proportionnés pour l'hébergement d'une garnison de 3 777 soldats

(tab. 3.3). Ils se traduisent, sur le terrain, par une mise en œuvre polyphasée et spatialement hiérarchisée de la ceinture fortifiée. Les ouvrages sont en effet construits en un peu moins de deux décennies, avec des phases d'accélération et de ralentissement effectuées au gré des réévaluations militaires (doctrinales et stratégiques) et budgétaires.

Ouvrage Séré de Rivières	Nom Boulanger	Commune	Date	Surface	Garnison	Coût (fr.-or)
Réduit de Chenay (**a**)	Ronzier	Chenay	1878-1880	2,8 ha	138	441 000
Fort de Saint-Thierry (**b**)	Barbier du Metz	Pouillon	1877-1880	5,5 ha	497	1 352 000
Batterie de Loivre (**c**)	/	Loivre	1875-1877	2,6 ha	150	399 000
Fort de Brimont (**d**	Drouet	Brimont	1875-1878	6,8 ha	729	2 455 000
Batterie du Cran de Brimont (**e**)	/	Brimont	1875-1877	1,8 ha	98	324 000
Fort de Fresne (**f**)	Souham	Fresne (anc. com.)	1883-1885	3,8 ha	382	1 000 000 (?)
Fort de Witry-lès-Reims (**g**)	Lowendal	Witry-lès-Reims	1875-1878	7,2 ha	377	1 416 000
Batterie de Berru (**h**)	/	Berru	1876-1879	5,1 ha	295	1 519 000
Vigie de Berru (**i**)	/	Berru	1880-1881	1,7 ha	100	363 000
Fort de Nogent-l'Abbesse (**j**)	Kellerman	Nogent-l'Abbesse	1875-1879	8,7 ha	421	2 304 000
Fort de la Pompelle (**k**)	Herbillon	Puisieulx	1883-1885	2,6 ha	277	630 000
Fort de Montbré (**l**)	Segur	Taissy	1877-1879	4,8 ha	313	1 380 000
Total				49,9 ha	3 777	13 583 000

Tableau 3.3 : Informations générales relatives aux ouvrages de type 1874 de la ceinture fortifiée de Reims.

Les figures 3.44 et 3.45 synthétisent cette dynamique à travers quatre phases principales de construction, séparées par deux périodes d'accalmie.

(i) La *première phase (1875-1876)* voit le lancement des premiers travaux, découlant de la priorité donnée au verrouillage des deux buttes-témoins dominant les approches septentrionales et orientales de la ville. Au nord, le fort de Brimont et ses deux batteries annexes (Loivre et Cran de Brimont) sont amenés à contrôler la Champagne, les débouchés vers la vallée de l'Aisne, la voie ferrée Reims-Laon-Tergnier, ainsi que la route de Montcornet qui intersecte la butte en arrière de la batterie du Cran (groupe fortifié de Brimont). À l'est, la butte de Berru voit la construction des forts de Witry-lès-Reims et Nogent-l'Abbesse, complétés par la batterie de Berru pour former le groupe fortifié de Berru. Ce dernier défend les directions jugées les plus vulnérables, correspondant à la voie ferrée vers Mézières, et la partie centrale du plateau champenois, face à la Lorraine. Le choix de ces implantations traduit une logique d'occupation prioritaire des points hauts, offrant des potentialités optimales pour le tir et le contrôle des positions dangereuses environnantes.

(ii) La *deuxième phase (1877-1880)* voit l'achèvement de la plupart des ouvrages de Reims, dont les forts de Montbré et de Saint-Thierry, ainsi que le réduit de Chenay. La construction de ces deux derniers ouvrages sur le revers de la côte d'Île-de-France, dont les stratèges, à cette époque, ne cessent de plébisciter la valeur défensive, exprime cette volonté d'effectuer la liaison entre les deux premiers môles défensifs et les reliefs plus en arrière. Ce groupe

fortifié de Saint-Thierry contrôle la vallée de la Vesle et le vallon de Trigny, ainsi que l'axe d'approche nord-ouest de la place depuis le secteur de Berry-au-Bac. En parallèle, la défense du Mont de Berru est complétée par la création de la vigie et un premier fort d'intervalle sur avant-butte de craie est construit au sud de Reims, afin de battre le front de côte septentrional de la Montagne de Reims (fort de Montbré).

(iii) Après plus de six ans de tergiversations concernant la fermeture de la ceinture, voyant l'entérinement du projet de ligne enveloppante de Séré de Rivières, la *troisième phase (1883-1885)* correspond finalement à la construction de deux nouveaux forts d'intervalle en rive droite de la Vesle, de part et d'autre du Mont de Berru. Ces ouvrages, les derniers de type 1874, sont dédiés à la maîtrise de l'interfluve Suippe-Vesle (fort de Fresne) et du corridor stratégique formé par la vallée de la Vesle et les voies de communication vers Châlons-sur-Marne et la Champagne (canal de l'Aisne à la Marne, voie ferrée, route ; fort de la Pompelle).

(iv) La *dernière phase d'activité (1891-1892)* correspond enfin à la construction de deux magasins-cavernes (ou magasins-sous-roc). Ils sont voués à recueillir les explosifs et munitions des magasins à poudre des forts jugés trop exposés après les expérimentations de la Malmaison (1886) révélant la vulnérabilité des structures maçonnées (*cf.* partie 2.5.1). Ces deux ouvrages souterrains, placés en contrebas de la vigie de Berru et du fort de Nogent-l'Abbesse, qui s'intègrent dans un mouvement national de décentralisation des explosifs amorcé à la fin des années 1880, constituent ainsi les deux seuls exemples de travaux de modernisation entrepris après la crise de l'obus-torpille (1885-1886).

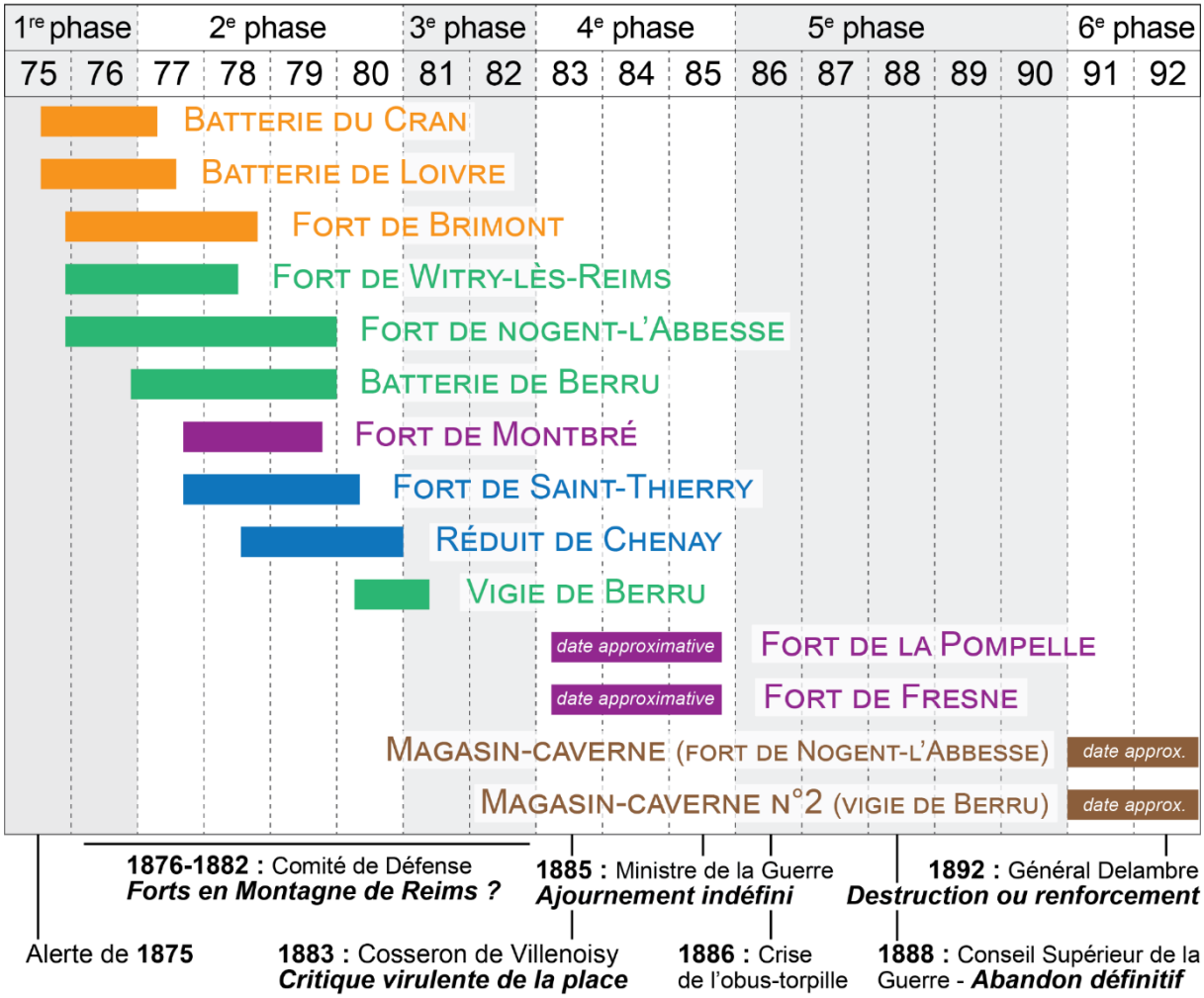


Figure 3.44 : Phases de construction et dates importantes de la place de Reims.

Cette temporalité discontinue constitue un élément important de la morphogenèse des forts, en conditionnant leurs caractéristiques morphologiques et le peu de modifications exercées sur les ouvrages de première génération. À l'issue de cette période de construction, la « ceinture » fortifiée prend ainsi plus précisément la forme d'un arc ouvert sur le sud-ouest (annexe 25), soit la position la moins dangereuse, épousant les lignes de crête en connexion topographique dans un rayon de 8 à 9 km autour de Reims (fig. 3.3). Cette utilisation des principaux reliefs, qui déterminent non seulement de bons points de vue mais aussi de multiples expositions favorisant les tirs de couverture tous azimuts (*cf.* partie 3.3.2.4), témoigne d'une remarquable utilisation du terrain (fig. 3.5).

Au-delà de la seule inscription morphologique des ouvrages dans le relief, la constitution de la ceinture fortifiée implique une organisation spatiale élargie, dépassant l'emprise immédiate des sites de construction et relevant d'enjeux territoriaux et fonciers.



Figure 3.45 : Ouvrages type 1874 de la ceinture de Reims selon le groupe fortifié (les traits noirs correspondent aux voies normales de chemin de fer). Les couleurs correspondent à celles présentées sur la figure 3.46. a : Réduit de Chenay ; b : Fort de Saint-Thierry ; c : Batterie de Loivre ; d : Fort de Brimont ; e : Batterie du Cran de Brimont ; f : Fort de Fresne ; g : Fort de Witry-lès-Reims ; h : Batterie de Berru ; i : Vigie de Berru ; j : Fort de Nogent-l'Abbesse ; k : Fort de la Pompelle ; l : Fort de Montbré. MdBe : Mont de Berru ; MdBr : Mont de Brimont ; MdR : Montagne de Reims ; MdST : Massif de Saint-Thierry ; Re : Reims ; SDR : Séré de Rivières.

3.2.3.3. Empreinte territoriale et foncière du chantier

La mise en œuvre de la ceinture fortifiée ne se limite pas à l'édification des ouvrages eux-mêmes. Elle s'accompagne d'une emprise territoriale plus diffuse, associée à un ensemble de dispositifs logistiques temporaires nécessaires à l'organisation du chantier et à l'acheminement des matériaux, ainsi qu'à des dispositifs fonciers intervenant en amont (expropriations, occupations temporaires) et en aval de la construction (servitudes militaires). Ces mécanismes modifient durablement ou plus ponctuellement l'occupation du sol et les usages locaux.

Les plans cadastraux faisant apparaître la future emprise fortifiée projetée (fig. 3.46A-B), de même que les procédures d'expropriation engagées dès 1875 pour les ouvrages des monts de Brimont et de Berru (annexe 26), illustrent l'ampleur des surfaces mobilisées, déjà suggérée par l'analyse de l'occupation du sol contemporaine (fig. 3.30, 3.37 ; annexe 27). Ces procédures, qui ne sont pas systématiques en raison du recours fréquent aux acquisitions amiables, traduisent néanmoins l'inscription rapide de la militarisation dans l'agro-sylvosystème rural, peu de temps après la fin de l'occupation allemande en septembre 1873 (*cf.* partie 2.2.2).

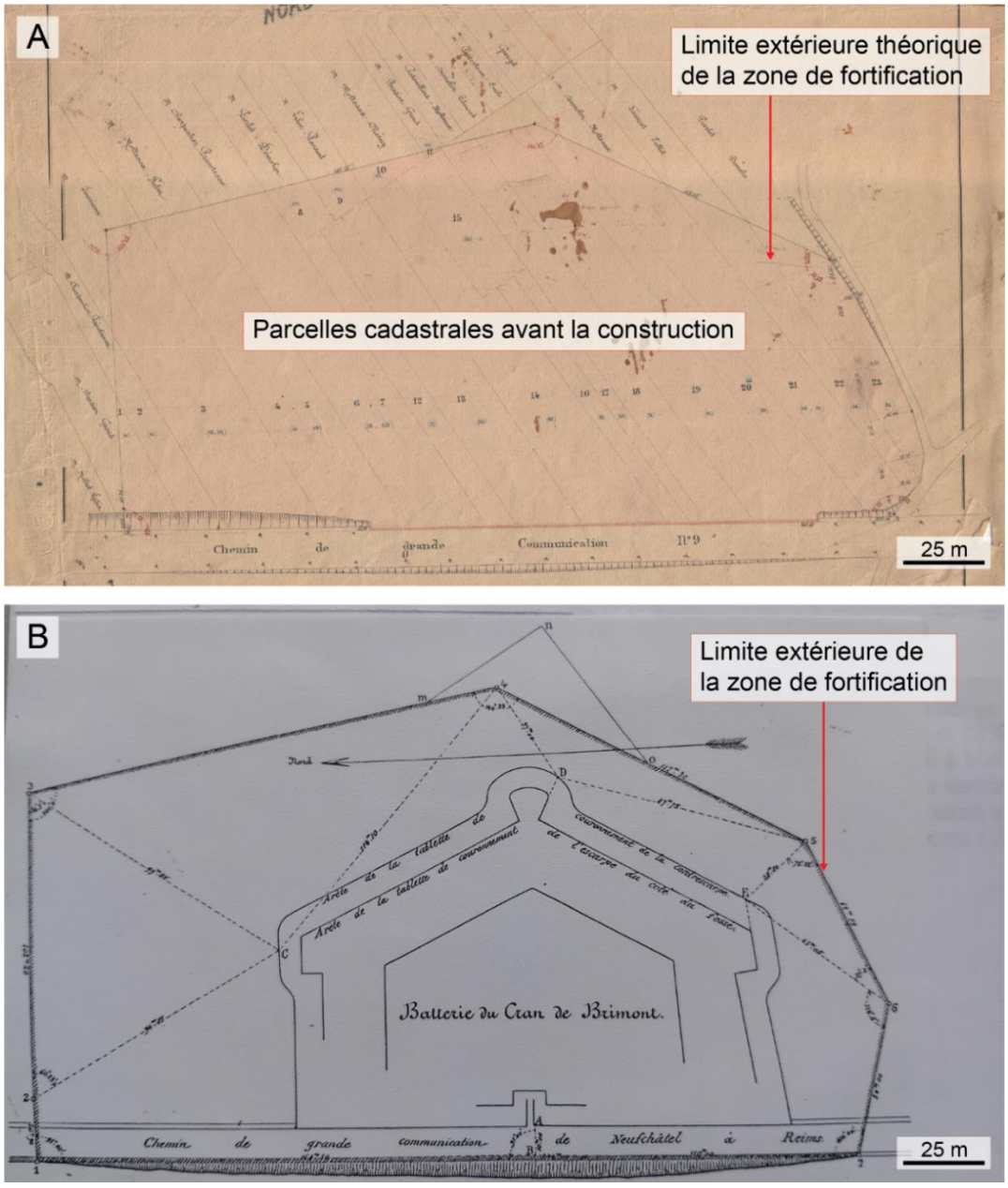


Figure 3.46 : Plan du site de la batterie du Cran de Brimont, avant (A) et après la construction (B). A : Plan d'origine des parcelles cadastrales concernées par la construction de la batterie du Cran de Brimont (fonds privé, Bruno Wysocinski) ; B : Plan de l'ouvrage et de la zone de fortification associée (fonds privé, Bernard Fouqueray).

Parallèlement, le plan du Génie des environs de Reims, levé en 1877 (*cf.* partie 4.2.2.5), atteste de la mise en place d'infrastructures provisoires implantées sur des terrains civils soumis au régime d'occupation temporaire, destinées à structurer les flux de matériaux et de main-d'œuvre. Celles-ci incluent notamment les voies étroites de chantier aménagées à travers le Mont de Berru par l'entreprise Lancesseur (fig. 3.47), ainsi que des bâtiments temporaires vraisemblablement installés au sud du fort de Brimont par l'entreprise Jouannetaud (fig. 3.48), respectivement en charge des chantiers des deux buttes. Ces installations éphémères jouent un rôle central dans l'organisation logistique et dans la gestion des effectifs mobilisés. Les recensements quinquennaux analysés par Durlet I. (2024) mettent en évidence des pics démographiques transitoires concomitants aux phases de construction (annexe 28), atteignant par exemple +260 habitants à Berru et +180 habitants à Nogent-l'Abbesse, et entraînant des recompositions temporaires de l'économie locale, notamment à travers la mise en circulation de monnaies de nécessité (annexe 29).

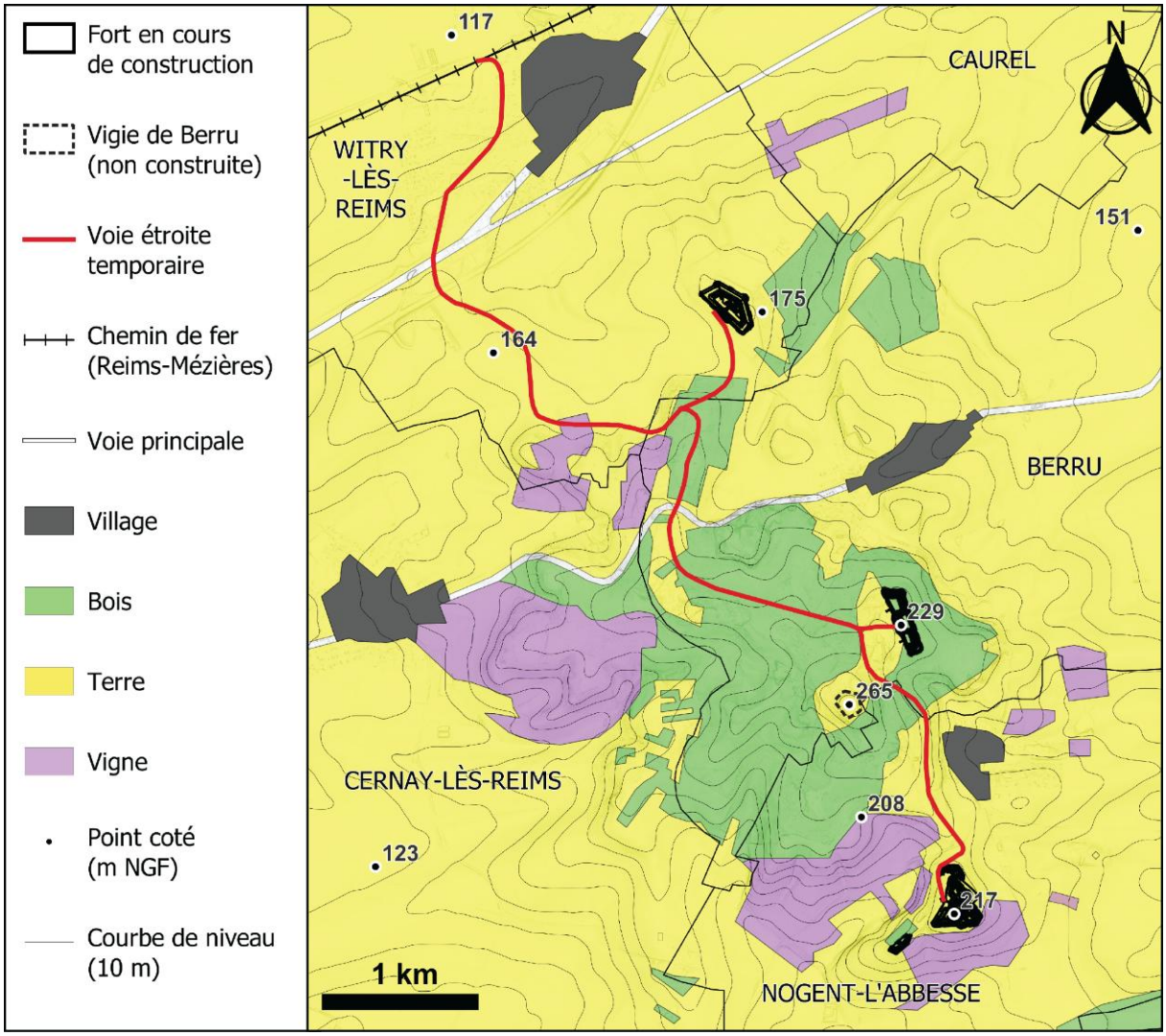


Figure 3.47 : Occupation du sol en 1874 et tracé de la voie étroite en 1877 (sources : atlas départemental des Ponts et Chaussée, CERHIC, URCA ; Plan du Génie de 1879, SHD, GR 1 V H 2141).

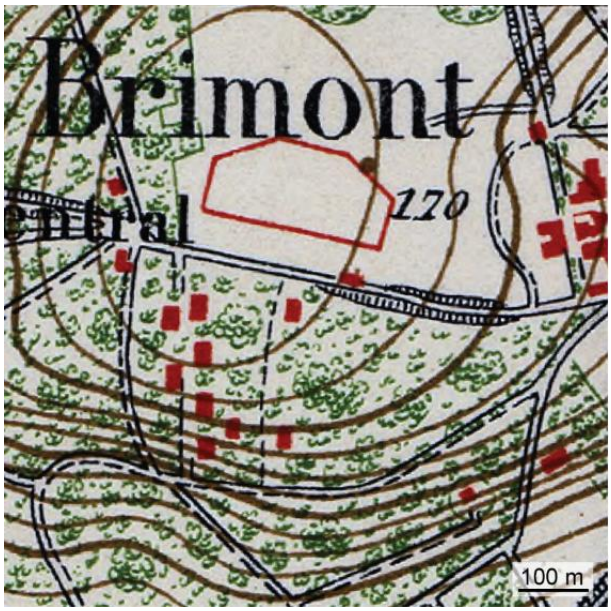


Figure 3.48 : Bâtiments temporaires n'apparaissant sur aucun autre document, supposément créés pour la construction du fort de Brimont (plan du Génie de 1879 ; SHD, GR 1 V H 2141).

Une fois les ouvrages achevés, l'influence spatiale des forts se prolonge à travers l'instauration des trois zones concentriques de servitude (250, 487 et 974 m)[8], dont le caractère contraignant décroît avec la distance, et qui visent à limiter toute implantation ou transformation susceptible de nuire aux exigences de la défense (*cf.* partie 2.4.2 ; Garnier, 2021). L'ensemble de ces dispositifs contribue ainsi à structurer durablement les usages, les circulations et les contraintes foncières dans l'environnement immédiat des ouvrages, constituant un cadre spatial conditionnant en partie les dynamiques ultérieures du paysage fortifié.

3.2.3.4. Fonctionnement initial et évolution tactique de la place de Reims jusqu'en 1914

Entre l'achèvement des ouvrages et le déclenchement de la Première Guerre mondiale, la place de Reims est affectée par des réajustements doctrinaux, stratégiques, politiques et budgétaires qui fragilisent rapidement le modèle initial de la fortification permanente (*cf.* partie 2.5). Conçus comme les éléments d'une place forte susceptible de structurer durablement la défense de la côte d'Île-de-France, les forts entrent précocement dans une trajectoire de déclassement et de redéfinition fonctionnelle. Cette évolution se traduit matériellement par une hiérarchisation des priorités d'équipement, dont des choix différenciés d'armement et une absence de modernisation lourde, qui produisent une hétérogénéité croissante au sein de la ceinture. L'analyse des archives militaires permet ainsi de distinguer trois phases principales, dont les traductions apparaissent notamment à travers l'évolution de l'armement théorique attribué aux ouvrages (fig. 3.49A-C).

[8] Une reconstitution théorique est proposée pour le Mont de Berru en annexe 30.

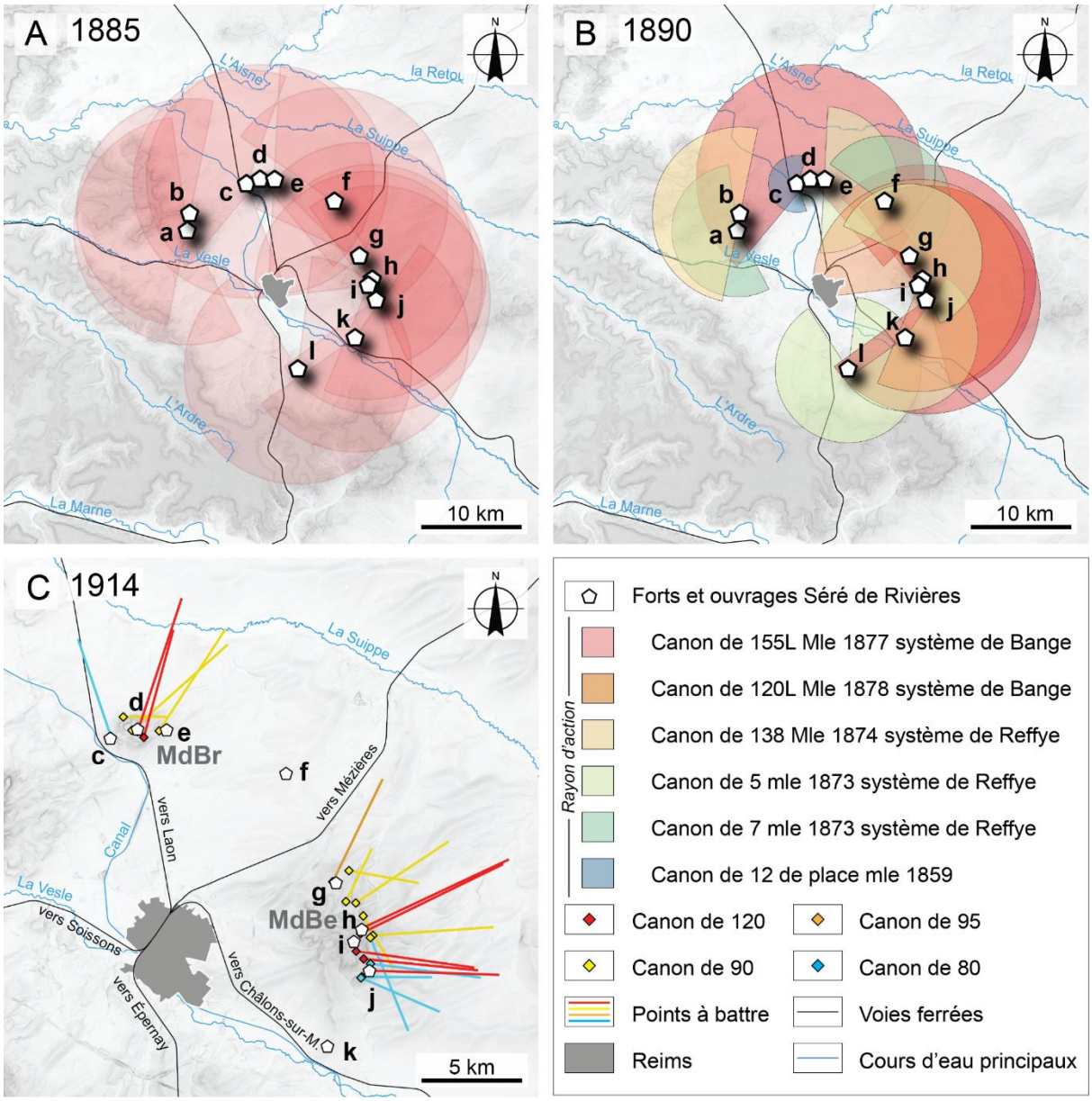


Figure 3.49 : Évolution de l'armement prévu en temps de guerre pour les forts de Reims. Les vignettes A et B indiquent le canon dont la portée est la plus étendue pour chaque ouvrage. La vignette C indique des positions à battre précises pour chaque canon. A : Déterminé d'après les feuilles de renseignements sur les « nouveaux forts » créés en 1880-1881 (SHD, GR 1 V H 2079 ; annexe 31) ; B : Déterminé à partir de l'état des bouches à feu à la date du 28 mai 1890 (SHD, GR 9 NN 4 156 1 2 ; annexe 32) ; C : Déterminé à partir du plan de mobilisation des ouvrages de Reims établi à la date ou 15 avril 1914 (plan XVII ; SHD, GR 7 N 1819). a : Réduit de Chenay ; b : Fort de Saint-Thierry ; c : Batterie de Loivre ; d : Fort de Brimont ; e : Batterie du Cran de Brimont ; f : Fort de Fresne ; g : Fort de Witry-lès-Reims ; h : Batterie de Berru ; i : Vigie de Berru ; j : Fort de Nogent-L'Abbesse ; k : Fort de la Pompelle ; l : Fort de Montbré ; MdBe : Mont de Berru ; MdBr : Mont de Brimont.

3.2.3.4.1. Phase 1 : la place forte de Reims

Durant une première phase, qui s'étend jusqu'à la crise de l'obus-torpille (1885-1886), les fortifications de Reims sont envisagées comme les composantes d'une *place forte*, voire d'un *camp retranché*. Dans le cadre des réflexions menées sur la mise en place d'une ligne de résistance intérieure sur la côte d'Île-de-France, le secteur rémois s'impose rapidement par

sa position centrale entre la cuesta et la Champagne, par le contrôle potentiel des principaux axes de pénétration, et par les qualités topographiques de ses reliefs périphériques (*cf.* partie 3.2.2.2). Dès juillet 1873, la SC souligne ainsi que « *les hauteurs de Brimont et Berru, dont l'occupation, combinée avec celle de la chaîne des collines situées en arrière de la place, constitue un vaste camp retranché capable de recevoir une grande armée* » (Séré de Rivières, 1873).

Après un premier projet évalué à environ 25 millions de francs-or en 1874[9], un programme plus resserré est adopté l'année suivante. Il aboutit finalement à la réalisation de l'actuelle ceinture fortifiée pour un montant deux fois moins élevé (tab. 3.3 ; fig. 3.44, 3.45), dotée d'un parc théorique d'environ 250 pièces d'artillerie, parmi lesquelles figurent les canons de 155L Mle 1877 système De Bange, offrant alors les portées les plus élevées (fig. 3.49A ; annexe 31). Cette ambition capacitaire traduit cette volonté initiale de conférer à la ceinture rémoise un rôle structurant dans la défense en profondeur du territoire français, ambition qui transparaît dans les débats du CD lors de l'adoption des scénarios successifs de fermeture de la place (fig. 3.42, 3.43).

3.2.3.4.2. Phase 2 : la fin d'un ensemble homogène

À partir du début des années 1880, s'amorce toutefois une remise en cause progressive de cette conception. En 1883, le général Cosseron de Villenoisy met publiquement en doute la capacité réelle des ouvrages à assurer une défense cohérente, estimant que leur conception n'est pas rationnelle. Cette défiance ouvre une deuxième phase, marquée par l'abandon de la logique de place forte au profit d'une *approche individualisée des ouvrages*. En cas de rupture de la ligne de résistance de la côte d'Île-de-France, il est envisagé dès 1885 que la ville de Reims soit évacuée et que les forts soient défendus comme de simples forts d'arrêt, voire détruits (Ministère de la Guerre, 1908).

Ce basculement doctrinal se traduit rapidement par des décisions concrètes, dans le cadre de la politique de modernisation sélective mise en place après la crise de l'obus-torpille (*cf.* partie 2.5.2 ; Truttmann, 2017). Il s'accompagne également d'une tentative de requalification symbolique des ouvrages par la réforme toponymique dite « Boulanger » de 1886, attribuant aux forts des noms de figures militaires (tab. 3.3), rapidement abandonnée dès 1887, révélatrice d'une instabilité administrative. La création de nouveaux ouvrages est indéfiniment ajournée, puis le Conseil Supérieur de Guerre considère en 1888 qu'il n'est plus nécessaire de fermer la trouée au sud-ouest de Reims. En 1889, les forts sont désormais « conservés pour valoir au besoin », statut entériné par décision ministérielle en 1890 (Ministère de la Guerre, 1908), puis formalisé dans un projet de loi en 1899. Sur le plan

[9] Ce premier projet envisage l'occupation de tous les reliefs environnant (dont la Montagne de Reims), plus de 200 pièces d'artillerie de gros calibre, une artillerie de campagne fournie, une garnison de 32 000 soldats et une division active de 8 000 hommes (Ministère de la Guerre, 1908).

matériel, cette dégradation du statut se manifeste par une concentration des équipements les plus performants (*e.g.*, système De Bange) sur les deux principaux groupes fortifiés (Berru et Brimont), tandis que les autres conservent des systèmes De Reffye plus anciens (fig. 3.49B). La ceinture cesse ainsi d'être pensée comme un ensemble homogène, et devient un dispositif hiérarchisé, dont le potentiel opérationnel des ouvrages est différencié.

3.2.3.4.3. Phase 3 : les forts comme points d'appui

Une troisième phase s'ouvre au tournant du XXe siècle, durant laquelle les forts de Reims sont définitivement envisagés comme de simples *points d'appui destinés à soutenir les armées de campagne* en repli. Cette orientation s'oppose aux projets ponctuels de renforcement global, tels que celui défendu par le général Delambre en 1892, et se trouve confirmée par la décision ministérielle du 20 février 1909, qui exclut explicitement toute transformation des ouvrages en forts capables de résister de manière autonome. En l'absence de statut officiel de place forte au sens du décret de 1891, la responsabilité de leur emploi est transférée au commandement des armées du Nord-Est, ce qui achève d'inscrire les ouvrages dans une logique d'utilisation opportuniste plutôt que dans celle d'un système défensif structuré (Ministère de la Guerre, 1908). Cette transformation constitue ainsi un symptôme du basculement doctrinal opéré en faveur de l'offensive au tournant dès les années 1890 (*cf.* partie 2.5.3).

À la veille de la guerre, ce positionnement tactique se traduit dans le plan XVII par une mobilisation limitée des capacités des forts. Faute d'effectifs et de matériels suffisants, seules les positions de Brimont et de Berru font l'objet d'une organisation défensive structurée, avec environ 65 canons, dont 12 de 155 De Bange (Ministère de la Guerre, 1914). La majorité des pièces est prévue hors des enceintes fortifiées, dispersée sur des points dominants du relief environnant, confirmant le rôle secondaire désormais assigné aux ouvrages (fig. 3.49C).

3.2.3.4.4. L'intégration aux réseaux de défense de la Première Guerre mondiale

Finalement, lors de l'entrée en conflit, bien que les civils soient réquisitionnés pour creuser des tranchées et couper des arbres autour des ouvrages, conformément au plan de mobilisation, l'armée française évacue la ville de Reims, déclarée ville ouverte le 2 septembre 1914, ainsi que « *les vieux forts inutiles et démodés qui l'entourent* » (Rollin, 1915).

Lorsque le front se stabilise à partir de l'automne 1914 dans l'environnement immédiat de Reims (annexe 33), les forts constituent des supports intégrés à une organisation militaire de campagne, loin du système défensif autonome imaginé à l'origine par le CD (*cf.* partie 2.5.4). Ils s'inscrivent progressivement dans un espace saturé de quatre positions successives de tranchées et d'aménagements logistiques, qui s'organisent sur 20 km de

profondeur de part et d'autre du *no man's land* (fig. 3.50 ; Taborelli, 2018)[10], ce qui modifie profondément leur rôle et leur environnement immédiat. La moitié de la ceinture, notamment située sur les deux buttes-témoins[11], est intégrée aux réseaux de défense allemands et se retrouve donc mal orientée par rapport à la ligne de front. À l'issue du conflit, les forts perdent progressivement leur fonction défensive et sortent du cadre militaire à des rythmes différenciés, par remise au domaine puis cession à des acteurs civils, ouvrant une phase de diversification des usages.

[10] Les réseaux de tranchées atteindront un linéaire total de 13 000 km pour 115 km de front en Champagne à l'issue du conflit (Taborelli, 2018).

[11] C'est notamment depuis les hauteurs de la butte de Berru que l'armée allemande effectue le bombardement de la cathédrale de Reims (annexe 34).

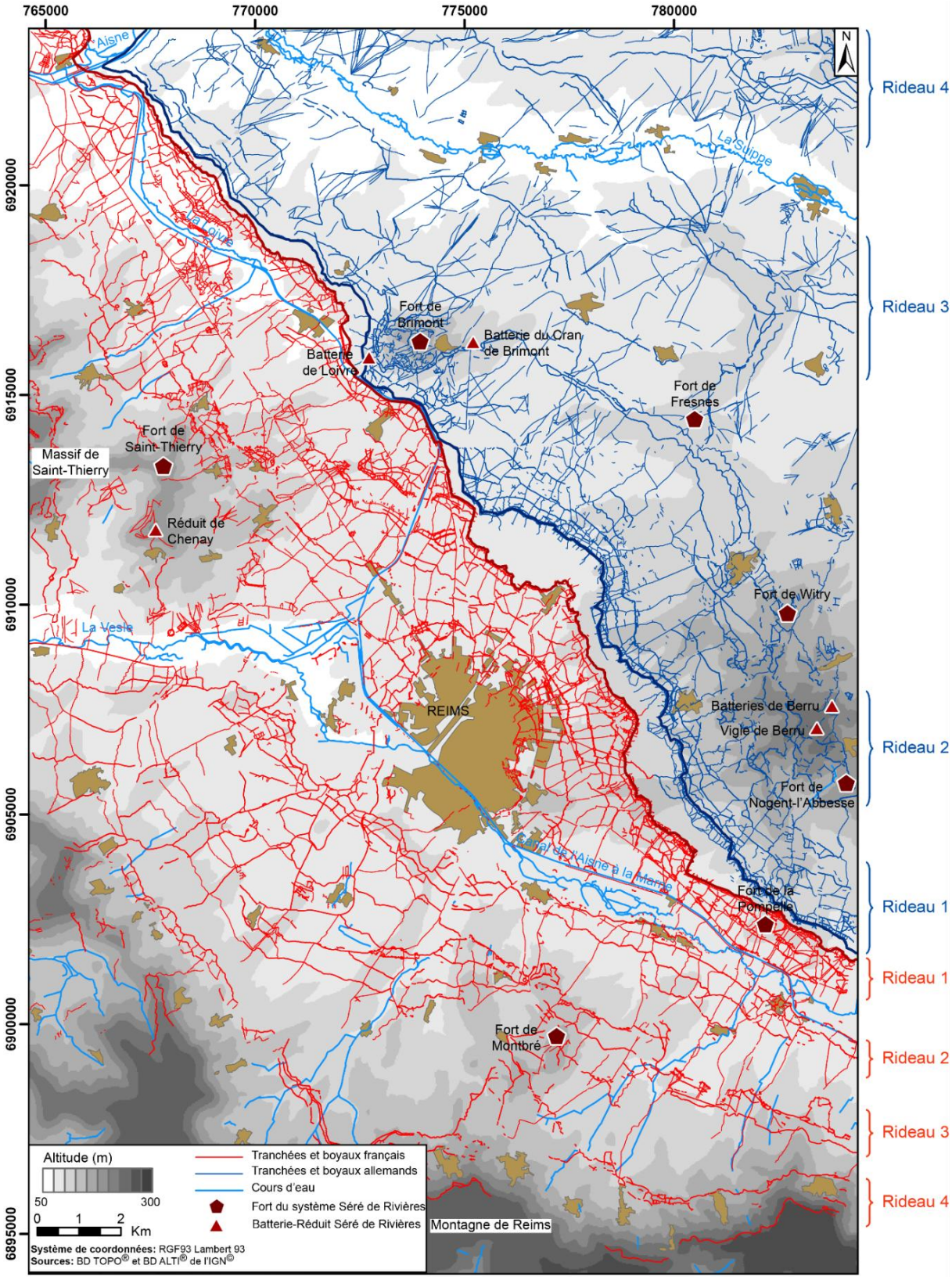


Figure 3.50 : Carte des réseaux de défense dans la région de Reims avant l'offensive allemande du 27 mai 1918 (Taborelli, 2018).

L'analyse de la mise en place de la ceinture fortifiée met en évidence une progression locale organisée en quatre phases de construction, étroitement corrélée aux inflexions doctrinales

et stratégiques nationales telles qu'elles apparaissent dans les procès-verbaux du Comité de défense. Sous la direction de Séré de Rivières, deux premières vagues de travaux s'engagent sur les principaux reliefs septentrionaux de la place (buttes de Berru et de Brimont, 1875-1879 ; Massif de Saint-Thierry, 1877-1880), puis sont complétées par des ouvrages d'intervalle de part et d'autre des buttes (1883-1885). La séquence constructive s'achève par la réalisation de deux magasins-cavernes, réponse ponctuelle à la crise de l'obus-torpille.

Au-delà des ouvrages, la construction produit également une empreinte territoriale diffuse (procédures foncières, infrastructures de chantier, servitudes militaires) qui reconfigure localement les usages du sol et installe, dès l'origine, un cadre de contraintes susceptible de laisser des traces durables, parfois indépendantes du fort lui-même. La rupture doctrinale de l'obus-torpille modifie ensuite le statut des forts de type 1874 : faute de modernisations lourdes, ils entrent dans une trajectoire de déclassement et de redéfinition fonctionnelle, cessant d'être pensés comme un système autonome et étant progressivement intégrés comme points d'appui au sein de dispositifs plus mobiles, jusqu'à leur réinvestissement partiel lors de la Première Guerre mondiale, avant d'amorcer, dans l'après-guerre, une diversification progressive des usages liée au passage au monde civil.

Conclusion de la partie 3.2

La partie 3.2 a permis de préciser le contexte d'élaboration, de construction et d'usage de la ceinture fortifiée de Reims, en articulant les dimensions paysagères, doctrinales, opérationnelles et tactiques qui conditionnent sa genèse et ses transformations.

La reconstitution de l'occupation du sol au cours du siècle précédant la construction des ouvrages fournit un état initial indispensable pour analyser, dans les sections suivantes, l'impact paysager de la fortification. Elle met en évidence une recomposition paysagère caractéristique du XIXe siècle, où un agro-sylvosystème paysan encore structurant coexiste avec l'émergence de nouvelles contraintes et opportunités socio-économiques. Les sites d'implantation des forts, souvent situés en contexte agricole ouvert ou forestier, traduisent cette double logique, tandis que le développement des activités extractives, et surtout du réseau ferroviaire, facilite l'acheminement des géomatériaux comme la mobilisation rapide des troupes.

Les forts de type 1874, premières fortifications détachées à cette échelle régionale, s'inscrivent dans la continuité d'un siècle de réflexions sur la défense du territoire en profondeur, au sein duquel Reims occupe une position stratégique centrale sur la côte d'Île-de-France. Cette place singulière explique la fréquence des discussions la concernant au sein du Comité de défense et conduit à la réalisation *ex nihilo* de sept forts et de cinq ouvrages secondaires, qui constituent l'objet principal de cette thèse.

Au-delà de leur seule construction, ces ouvrages s'inscrivent dans des trajectoires fonctionnelles évolutives, depuis leur rôle initial dans le dispositif de fortification permanente jusqu'à leur déclassement progressif, leur réinvestissement partiel en contexte de guerre, puis leur sortie du domaine militaire. Ces glissements successifs contribuent à la superposition de nouvelles morphologies sur les structures héritées de la fortification, qu'elles soient liées aux usages militaires ou civils, ce qui inscrit les forts dans des trajectoires morphologiques complexes. L'analyse des formes et des héritages, abordée dans les parties suivantes, permettra d'interroger finement ces dynamiques et d'en restituer les signatures dans le relief.

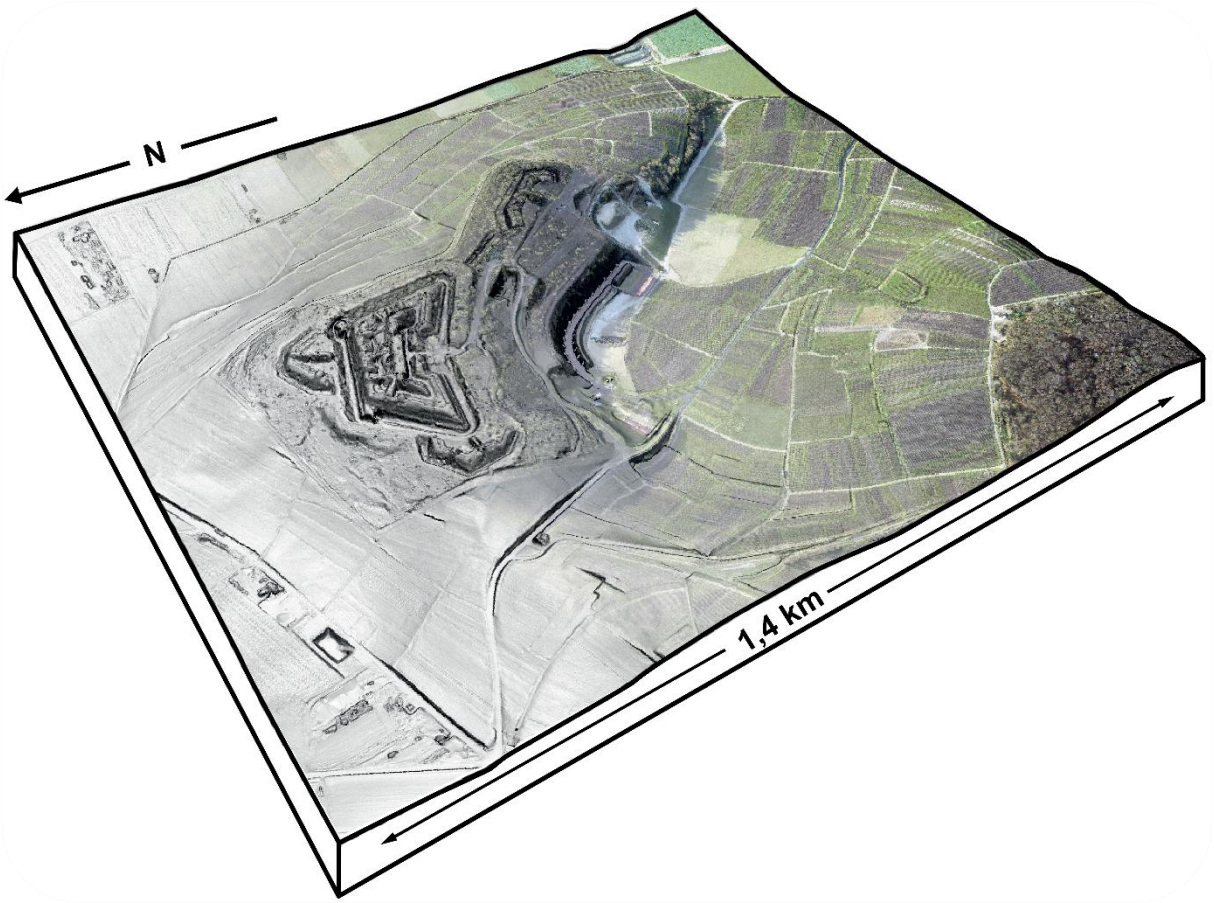
Conclusion du chapitre 3

Le chapitre 3 a permis d'établir le cadre géographique et historique indispensable à l'interprétation géomorphologique des fortifications de la ceinture de Reims. L'analyse croisée des composantes environnementales et des dynamiques territoriales a mis en évidence le rôle déterminant des contrastes géomorphologiques, hydrogéologiques et biogéographiques dans les choix d'implantation, et donc l'organisation spatiale, les modalités de construction et les trajectoires ultérieures des ouvrages, jusqu'à la Première Guerre mondiale. La position d'interface entre Champagne crayeuse et plateaux de formations tertiaires de la côte d'Île-de-France, associée à des contextes d'occupation du sol différenciés, conditionne en effet à la fois les caractéristiques topographiques, la disponibilité en géomatériaux, les propriétés géotechniques des terrains et les dynamiques contemporaines de conservation ou d'effacement des formes.

La mise en perspective géohistorique et historique a parallèlement permis de replacer la construction de la ceinture fortifiée dans les recompositions paysagères, techniques, doctrinaux et stratégiques de la fin du XIXe siècle. Les ouvrages s'inscrivent dans des espaces déjà structurés par des usages agro-forestiers et extractifs, puis profondément reconfigurées par leur mise en défense et la guerre, et enfin par une diversification de leurs usages. Ces trajectoires contribuent à la superposition de morphologies d'origines diverses, militaires et civiles, qui expliquent la complexité du palimpseste topographique observé aujourd'hui.

Ce cadre géographique et historique constitue ainsi le socle interprétatif des analyses morphologiques et morphogénétiques menées dans les chapitres suivants. Il permet de relier les formes révélées par les données LiDAR aux contraintes physiques du territoire, aux choix d'implantation effectués à différentes échelles, et aux usages successifs qui en ont influencé la genèse et les transformations postérieures, pour aboutir aux états de conservation actuels. Le chapitre suivant est consacré à la présentation des choix méthodologiques et des dispositifs d'observation mobilisés pour documenter ces morphologies, en croisant données LiDAR, sources d'archives et investigations de terrain sous système d'information géographique.

CHAPITRE 4 : MATÉRIELS ET MÉTHODES



Vue 2,5D du fort de Nogent-l'Abbesse
(orthophotographie, MNT IMPACT 14-18 traité visuellement avec un indice de pente, 2015)

4. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Ce chapitre présente les outils matériels et numériques mobilisés, les données traitées, ainsi que les méthodes employées dans la thèse, en apportant une réflexion critique sur leurs implications dans l'analyse des paysages fortifiés.

L'approche centrale de cette thèse repose sur l'analyse spatiale et morphologique des forts Séré de Rivières de Reims, réalisée à partir de données LiDAR sous SIG. Par métonymie, le terme « SIG » désigne ici à la fois l'infrastructure informatique utilisée pour l'acquisition, le traitement et la visualisation des données géographiques (Aschan-Leygonie et al., 2019), mais aussi l'ensemble du projet d'étude des fortifications, pouvant être mobilisé comme aide à la décision, par exemple pour les décideurs politiques gérant nos territoires. Cette double acception reflète l'interdépendance entre l'outil et la méthodologie qu'il soutient, et met en lumière la nécessité d'une réflexion approfondie sur la structuration de cette approche.

Ce chapitre s'inscrit dans une démarche réflexive qui prend en compte les nouveaux paradigmes scientifiques issus de la révolution numérique. Il se veut également en phase avec les pratiques responsables et les enjeux actuels des mégadonnées (ou *big data*) et de la science ouverte (ou *open science*) en mettant l'accent sur les données FAIR (*Findable, Accessible, Interoperable, Reusable ;* en français : faciles à trouver, accessibles, interopérables, réutilisables), garantissant ainsi la reproductibilité et la standardisation des pratiques scientifiques.

Dans ce contexte, la méthodologie développée s'inscrit dans un environnement de production et de diffusion des données géographiques largement structuré par les principes de la directive INSPIRE, notamment en ce qui concerne les systèmes de référence (RGF93, Lambert 93, EPSG:2154), l'harmonisation des jeux de données et les exigences de documentation. Sans revendiquer une conformité stricte à ce cadre normatif, conçu prioritairement pour les autorités publiques, ce travail en mobilise néanmoins les principes fondamentaux, tout en s'en écartant volontairement lorsque l'analyse nécessite la construction d'objets géographiques non standardisés, tels que les reliefs fortifiés et les polémoformes en tout genre.

La méthodologie est déclinée en plusieurs sous-parties, chacune répondant à une approche spécifique, selon les disciplines et sous-disciplines impliquées dans l'analyse géographique.

Dans un premier temps, la dimension historique des fortifications Séré de Rivières justifie la présentation des documents d'archives associés qui ont été utilisés, issus de recherches menées dans différents services d'archives publiques et fonds privés (4.1). Cette démarche enrichit les connaissances historiques sur la ceinture fortifiée et fournit des indices microhistoriques essentiels à l'élucidation de certaines hypothèses.

Ensuite, une sous-partie géohistorique et géomatique présente les bases de données (BD) utilisées pour l'étude des polémoformes de Reims, en détaillant les méthodes d'intégration des documents cartographiques et photographiques et des BD vectorielles au SIG (4.2).

L'étude géomorphologique de la polémotopographie, qui constitue l'axe principal de la thèse (*cf.* partie 1.4), est réalisée à travers les données LiDAR aéroportées employées selon une méthode d'exploitation inspirée de Lozić et Štular (2021). Cette approche planimétrique considère les fortifications avant tout dans leur dimension horizontale, en tant que formes géomorphologiques (4.3).

La dimension environnementale de l'étude est enrichie par des approches géologique et biogéographique (4.4). L'étude des géomatériaux est basée sur la notion du « cycle des géomatériaux du bâti », inspirée des travaux réalisés au sein du GEGENA depuis plus de 20 ans (Fronteau et al., 2014, 2022). Elle procède, à l'inverse, de la dimension verticale des fortifications, lesquelles, avant de former un relief en surface, constituent des structures bâties sub-surfaciques, telles qu'elles sont traditionnellement abordées par la littérature scientifique (*cf.* introduction générale). Les méthodes employées pour cette étude incluent du dépouillement d'archives, des relevés de façade, des reconnaissances sur le terrain, et des techniques SIG, lasergrammétriques et photogrammétriques, principalement inspirées de Laratte (2022) et Fronteau et al. (2014, 2019). Dans une seconde étape, l'analyse de la végétation repose sur des relevés botaniques couplés à l'exploitation de documents cartographiques anciens et de BD vectorielles publiques sous SIG.

4.1. Archives

Les archives sont comprises comme « *l'ensemble des documents, y compris les données, quels que soient leur date, leur lieu de conservation, leur forme et leur support, produits ou reçus par toute personne physique ou morale et par tout service ou organisme public ou privé dans l'exercice de leur activité* » (Code du patrimoine, article L211-1).

Ce travail a principalement impliqué le recueil et le dépouillement d'archives publiques, comprises comme « *les documents qui procèdent de l'État, des collectivités locales, des établissements publics, des organismes chargés d'une mission de service public, [et] des entreprises publiques* » dans la loi du 3 janvier 1979 sur les archives, et dans une moindre mesure d'archives privées définies en négatif. Ces dernières correspondent ainsi autant aux « *archives de familles, d'associations, de personnes privées que celles des entreprises et des établissements bancaires, commerciaux »* (Boisdeffre, 2005). « *[L]es plus modestes collections peuvent, sous ce rapport, être [ainsi] aussi utiles que les plus célèbres* » (Marquis de Vogüé, cité par Cagnat, 1918). Cette dichotomie se distingue de celle de la nature des fonds archivistiques pouvant être également privés ou publics tout en contenant potentiellement chacun des deux types d'archives.

Bien que « *mesurées à l'aune utopique d'une documentation universelle, les archives [soient] notoirement lacunaires* » (Schenk, 2014), il est possible de souligner une relative indigence des sources historiques relatives aux fortifications Séré de Rivières. Les manuscrits et plans contemporains à la construction ne bénéficient en effet d'aucune copie lorsqu'ils sont transmis à la hiérarchie pour paraphe, traversent les deux conflits mondiaux et subissent les dispersions administratives caractéristiques de la deuxième moitié du XXe siècle, car ils sont rédigés et levés avant la généralisation du papier calque (Truttmann, 2017). Leur conservation n'a pas non plus été favorisée par l'obsolescence précoce de ces infrastructures défensives (crise de l'obus-torpille de 1885-1886 ; *cf.* partie 2.1.5 ; Rocolle, 2002), probablement exacerbée par la montée du pacifisme en France (Mollier, 2001) et l'émergence de doctrines offensives au sein de l'armée française (Queloz, 2009 ; *cf.* partie 2.5).

La réalité de ce constat est cependant variable d'une place fortifiée à l'autre. Autour de Verdun, par exemple, les plans de construction du fort de Douaumont (de masse, de niveau, d'élévation, *etc.*), construit à partir de 1884, sont assez complets pour envisager sa reconstitution en 3D et le polyphasage précis des différentes étapes de construction (Panoryia, 2023). À Reims en revanche, les seuls documents planimétriques contemporains à l'édification des ouvrages se restreignent à un ensemble de planches relativement généralistes représentant le fort de Brimont en aquarelle, mais présentant toutefois des cotes en trois dimensions (fig. 4.1), à un plan des structures de la batterie de Loivre (1877 ; SHD

GR 2 V 105) ainsi qu'à des plans des magasins-cavernes construits en 1891-1892 (GR 9 NN 4 287 3).

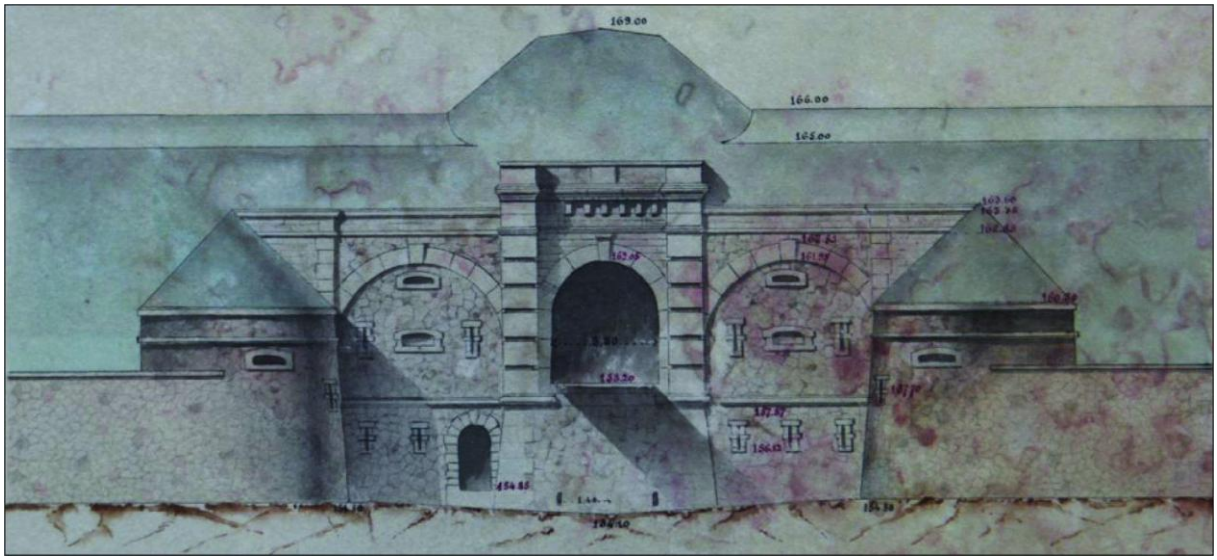


Figure 4.1 : Extrait des plans du fort de Brimont dessiné en aquarelle sous la direction du Lieutenant-Colonel du Génie en chef Lestelles en 1880 (SHD, GR 4 V T 346 1).

La documentation disponible dépouillée, manuscrite, dactylographiée, cartographique et planimétrique, a tout de même permis de documenter partiellement les trajectoires des forts Séré de Rivières de Reims. Les principaux sujets sont (i) l'évolution de la couverture et de l'usage du sol depuis le XIXe siècle, (ii) la militarisation du territoire rémois postérieure à la défaite franco-prussienne, ainsi que (iii) les caractéristiques théoriques et techniques des ouvrages fortifiés et (iv) l'histoire des forts pendant la Première Guerre mondiale.

Les documents exploités proviennent principalement de trois centres d'archives nationaux et départementaux, ayant fait l'objet d'une recherche systématique de tout document ancien relatif aux fortifications Séré de Rivières de Reims : le Service Historique de la Défense (SHD), la Bibliothèque nationale de France (BNF) et les Archives départementales de la Marne (AD51).

La première étape a consisté à identifier, dans les inventaires d'archives, les occurrences relatives aux fortifications Séré de Rivières de Reims (tab. 4.1). Les cadres de classement se sont révélés essentiels pour comprendre l'organisation des archives et accéder aux inventaires spécifiques. Une recherche lexicale approfondie a été menée en mobilisant les inventaires numériques, ainsi que les inventaires simplement numérisés, après la réalisation d'une reconnaissance optique de caractères (ROC), c'est-à-dire une transformation informatique d'images numériques de textes manuscrits ou dactylographiés en fichiers exploitables dans des logiciels de traitement de texte (Elagouni et al., 2012). Les index des inventaires numérisés non traités et papiers ont été en parallèle examinés exhaustivement.

Forts de Reims	Réduit de Chenay	Fort de Witry-lès-Reims
Fort de Brimont	Fort de Saint-Thierry	Fort de la Pompelle
Fort de Nogent-l'Abbesse	Forts de Berru	Fort de Montbré
Batterie de Loivre	Vigie de Berru	Batterie du Cran de Brimont
Fortifications de Reims	Batterie de Berru	Redoute de Chenay
Ceinture de Reims	Fort de Fresnes-lès-Reims	Batterie du Moulin

Tableau 4.1 : Exemples de mots-clés utilisés dans la recherche archivistique.

L'accès aux documents a varié en fonction des règles propres à chaque institution et du degré de numérisation des fonds. Si un large mouvement de numérisation a été entrepris depuis une vingtaine d'années, il a essentiellement bénéficié aux archives généalogiques, qui constituent la majeure partie des demandes du public (Luquet, 2006). Dans ce contexte, la faible notoriété des fortifications Séré de Rivières n'a probablement pas favorisé la numérisation des archives afférentes, d'autant plus que les arbitrages se font sur des volumes considérables de documents[12].

4.1.1. SHD

Le SHD regroupe les archives publiques du ministère des Armées. Rattaché à ce ministère, il dépend de la Direction de la Mémoire, de la Culture et des Archives (DMCA), une des directions du Service général pour l'administration (SGA). Créé par le décret n°2005-36 du 17 janvier 2005, le SHD est le résultat du regroupement des archives des quatre branches de l'armée française (armée de Terre, armée de l'Air, Marine nationale, Gendarmerie nationale). Il constitue ainsi le centre d'archives militaires de référence pour tout chercheur ou passionné intéressé par l'histoire militaire de la France, et notamment par l'étude des fortifications Séré de Rivières, comme c'est le cas pour cette thèse[13].

4.1.1.1. Archives de l'armée de l'Air (AI)

- AI A - Première Guerre mondiale

AI 1 A Aéronautique de la Première Guerre mondiale, Grand Quartier Général

La sous-série AI 1 A regroupe les archives aéronautiques de la Première Guerre mondiale, issues des archives de l'armée de l'Air (AI), précédant la série 2 A, dédiée aux carnets de comptabilité en campagne (Auer-Véran et al., 2008). Ces documents ont été collectés par le Service historique de l'armée (SHA), principalement au sein des archives du Grand Quartier Général (GQG), l'organe de commandement des armées en campagne créé lors

[12] Le SHD comporte par exemple 450 km linéaires d'archives et un million d'ouvrages en bibliothèque (Nevès, 2018).

[13] Site officiel du Service historique de la Défense, Ministère des Armées, consulté le 27/12/2025, accessible à l'adresse : https://www.servicehistorique.sga.defense.gouv.fr/.

de la mobilisation (Boucard, 1936). L'inventaire de la série 1 A, publié en 2005, est structuré en quatre parties (Auer-Véran et al., 2008) : les archives du ministère de la Guerre et du GQG (I), celles des services aéronautiques des armées et des unités (II), des suppléments (III), et enfin, la section consacrée aux archives cartographiques et photographiques (IV). C'est dans cette dernière que se trouvent la majorité des photographies aériennes utilisées dans cette thèse (*cf.* partie 4.2.3.1).

La gestion de ces archives a été confiée, dans les années 1930, à un service d'étude géographique et historique nouvellement créé au sein de l'armée de l'Air (Auer-Véran et al., 2008). Durant la Seconde Guerre mondiale, de nombreux documents ont été récupérés par les Allemands après avoir été abandonnés à Paris. L'urgence de l'évacuation, face à l'avancée de l'armée allemande, a conduit à une sélection des documents les plus cruciaux. Les photographies ont ensuite été reclassées au dernier tiers du XXe siècle selon un critère géographique (département, arrondissement, canton), remplaçant le classement par mission qui prévalait jusque-là.

4.1.1.2. Guerre et armée de Terre (GR)

- GR M - Service historique de l'armée et Dépôt de la guerre

GR 6 M Fonds de cartes

La sous-série 6 M rassemble un fonds cartographique lié au SHA et au Dépôt de la guerre, couvrant la période de 1688 à 1945. Ce fonds inclut divers atlas géographiques et historiques de la France métropolitaine et de l'ancien empire colonial français, ainsi que les plans directeurs des GCTA (groupe des canevas de tir des armées) de la Première Guerre mondiale, organisés par échelle spatiale. Une recherche exhaustive a été menée sur les plans directeurs, disponibles aux échelles 1/20 000 (L VI B1 C), 1/10 000 (L VI B1 B) et 1/5 000 (L VI B1 A), les plus couramment utilisées pendant le conflit, et comportant des plans du secteur de la ceinture fortifiée de Reims (*cf.* partie 4.2.2.6).

- GR N - Troisième République (1872-1940) et GR NN (supplément)

La série N est composée de documents créés sous la IIIe République et se divise en 34 sous-séries totalisant 460 m linéaires en 2019 (Nicot, 1969 ; Nicot et al., 1972 ; Devos et al., 1974). Parmi les cinq sous-séries utilisées dans cette thèse, seule celle relative à l'état-major de l'armée (7 N) couvre l'intégralité de la période de la IIIe République. Cette série est particulièrement précieuse car elle contient des archives sur la défense du territoire national, telles que des mémoires stratégiques, des rapports sur l'inspection des places et des documents sur les régions fortifiées. Elle permet par exemple d'accéder au plan de

mobilisation et à la mise en défense de la place de Reims, en vigueur au début de la Première Guerre mondiale (plan XVII, SHD, GR 7 N 1819).

Trois autres sous-séries se concentrent sur des documents créés pendant le conflit, notamment au GQG (16 N), dans les groupes d'armées (18 N) et les armées du front occidental (19 N). La sous-série 26 N contient enfin l'ensemble des journaux des marches et des opérations (JMO) créés pendant la Première Guerre mondiale afin de recenser tous les événements militaires se produisant, de l'échelle des GQG à celles des compagnies. Ces journaux ont été explorés pour étudier l'organisation de l'armée française entre les arrières et le front champenois, ainsi que les opérations militaires menées en Champagne, en Montagne de Reims, et autour de certains forts de Reims, comme la Pompelle et Brimont. Deux JMO ont notamment permis d'attester de l'emploi d'artillerie lourde sur voie ferrée (ALVF) à l'encontre des forts tenus par les Allemands, de Brimont et de Nogent-l'Abbesse.

Un intérêt particulier a également été porté sur les archives rapatriées de Russie, relatives à la direction du Génie (GR 9 NN 4). Ces documents, issus des fonds dits « Moscou », ont été restitués par la Russie après la chute de l'URSS, après avoir été spoliés par les Allemands en 1940, durant la Campagne de France, puis récupérés par l'Armée soviétique en 1945. Ils contiennent une collection éclectique de documents multiscalaires, incluant des expériences de résistance des matériaux, des rapports sur la révision de l'armement de Reims, des études d'architecture des casernements, des préconisations sur l'organisation des voies ferrées pour la défense des places fortes, ainsi qu'un rapport sur l'éclairage à la lampe à pétrole de la place de Reims.

- GR V - Archives techniques du Génie

La série des archives du Génie se compose de six sous-séries, dont les deux premières ont été consultées dans le cadre de la thèse : dépôt des fortifications (1 V), section technique du Génie (2 V), inspection du Génie (3 V), archives des directions de travaux (4 V), outre-mer (5 V) et fonds ouvert (6 V).

GR 1 V - Dépôt des fortifications (1660-1940)

Les archives du Dépôt des fortifications couvrent près de quatre siècles d'activité des services du Génie français. Créé conjointement au Comité des fortifications par la loi du 10 juillet 1791, le dépôt rassemble les productions des officiers et ingénieurs militaires afin d'alimenter les réflexions stratégiques menées à l'échelle nationale (Salat, 2011). Son fonds documentaire dépasse toutefois sa stricte période d'existence administrative, intégrant des documents antérieurs dans un souci de continuité historique, puis des versements postérieurs issus successivement de la section technique du Génie et de l'inspection du

Génie, avant son rattachement définitif au Service historique de l'armée de Terre (SHAT ; Salat, 2011).

L'attention a notamment été portée sur les articles relatifs aux travaux mixtes (GR 1 VF), via les délibérations de la commission mixte des travaux publics (CMTP ; 1-579), sur les places françaises et d'Algérie (GR 1 VH) et enfin sur les objets d'art (GR 1 VR) relatifs à la fortification permanente (1-29), aux terrassements, gazonnages et plantations (83-84), aux constructions diverses, matériaux et éléments de construction (85-103), aux études et types de construction et de bâtiments (104-134) et aux travaux hydrauliques (135-140).

GR 2 V Section technique du Génie

Les archives de la sous-série 2V proviennent de la Section Technique du Génie (STG) qui a pour mission de seconder la commission du Génie instaurée par le décret du 1er mars 1886 (Salat et Barros, 1997). Cette dernière est née sous l'impulsion du ministre de la Guerre (le général Boulanger), en réponse à la multiplication néfaste des commissions et comités au sein du ministère de la Guerre.

Les articles consultés concernent les matériels de chemin de fer (55), des mesures générales prises dans la fortification permanente (69), les magasins à poudre et à munitions (79), les travaux des places de métropole (80-103), des recueils de croquis d'exécution d'ouvrages fortifiés (105), des procès-verbaux de commissions d'étude spécialisées (150-195) et le Génie pendant la Première Guerre mondiale (196-235, notamment 225).

Cette sous-série comprend également les archives du service du cuirassement (290-361) couvrant la période 1877-1927, qui évoquent les innovations des engins cuirassés apparus au gré des progrès de la métallurgie. Ils n'ont cependant pas été consultés car les forts de Reims ne sont concernés par aucune des premières formes de cuirassement en fer laminé utilisés dès 1874 dans certains forts de première ligne (*e.g.*, forts du Parmont, de Château-Lambert ; Salat et Barros, 2005), ni par les modernisations cuirassées caractéristiques des fortifications créées après 1885-1886 en réponse à la crise de l'obus-torpille (*cf.* partie 2.5.2).

- GR W - Archives techniques de l'artillerie

GR 3 W

La sous-série 3 W correspond aux archives techniques de l'artillerie (GR 3), issues d'opérations militaires (attaque et défense, armement, campagnes) menées entre 1632 et 1954. Elles sont organisées en thématiques portant sur des informations générales (3-4), les magasins à poudre des places (5, 9-10), la défense des frontières (17-18, 64-65, 69, 78-79) et les batteries et parcs d'artillerie (125, 130, 143).

4.1.1.3. Modalités de récupération des archives

En complément de la recherche de cotes, via le cadre de classement (annexe 35) et les inventaires en ligne, les échanges avec les archivistes du SHD ont permis d'accéder à des inventaires internes non actualisés ou non diffusés. L'apport majeur a été l'obtention d'un tableur recensant plus de 10 000 clichés réalisés par les sections de photographes de l'armée française pendant la Première Guerre mondiale (tab. 4.2).

Nature du document	carton	dossier	Unité et/ou série	numéro	Date	Région	Département	Arrondissement	Canton	Commune	Code INSEE	Lieu-Dit
Photographie aérienne	Al 1 A 354	2	Ve Armée	19	12/05/1915	Grand-Est	Marne	Reims	Bourgogne	Bourgogne-Fresne	51075	Fort de Fresnes
Photographie aérienne	Al 1 A 354	2	Ve Armée	20	12/05/1915	Grand-Est	Marne	Reims	Bourgogne	Witry-lès-Reims	51662	Nord est de Witry-lès-Reims
Photographie aérienne	Al 1 A 354	2	Ve Armée	21	12/05/1915	Grand-Est	Marne	Reims	Bourgogne	Bourgogne-Fresne	51075	Fort de Fresnes
Photographie aérienne	Al 1 A 354	2	Ve Armée	22	12/05/1915	Grand-Est	Marne	Reims	Bourgogne	Witry-lès-Reims	51662	Est Le Linguet
Photographie aérienne	Al 1 A 354	2	Escadrille C 39	23	10/10/1915	Grand-Est	Marne	Reims	Bourgogne	Courcy	51183	Les Cavaliers de Courcy
Photographie aérienne	Al 1 A 354	2	Escadrille C 39	24	10/10/1915	Grand-Est	Marne	Reims	Bourgogne	Courcy	51183	Est Cavaliers de Courcy
Photographie aérienne	Al 1 A 354	2	Escadrille C 39	25	10/10/1915	Grand-Est	Marne	Reims	Bourgogne	Courcy	51183	Les Cavaliers de Courcy
Photographie aérienne	Al 1 A 354	2	Escadrille C 39	26	10/10/1915	Grand-Est	Marne	Reims	Reims-8	Puisieulx	51450	Est Fort de la Pompelle

Tableau 4.2 : Extrait du tableur inventoriant toutes les photographies aériennes du SHD prises par l'armée française durant la Grande Guerre.

L'accès aux documents a nécessité plusieurs déplacements physiques, exclusivement sur le site du château de Vincennes, abritant le SHD, parmi les dizaines d'autres sites répartis sur le territoire métropolitain. Le dépouillement des archives non numérisées s'est principalement effectué dans la salle de lecture Louis XIV, suivant des règles de réservation et de consultation strictes : consultation de cinq cotes par jour, réservation plus d'une semaine à l'avance (validation après plusieurs jours), voire deux à trois semaines en cas de fort taux d'occupation.

Outre l'usage de portables et d'appareils photographiques, des scanners A3 ont été mis à disposition sur place pour la numérisation sur la période 2022-2024. Pour les plans de format supérieur à A3 (*e.g.*, les plans directeurs), l'absence de potence pour la prise de vue a nécessité de capturer plusieurs clichés à main levée, assemblés ensuite à l'aide de l'outil Photomerge de Photoshop v. 25.11.

4.1.2. Archives départementales de la Marne

Les archives départementales de la Marne « *classent, conservent et communiquent au public [les] documents [d'archive] d'une grande variété [(34 km linéaire)] d'origines, de supports ou d'époques [(depuis le Xe siècle)], et qui constituent le reflet de la vie politique, économique, sociale et culturelle du territoire [marnais]* »[14]. Elles émanent, dans l'effervescence de la Révolution française, de

[14] https://archives.marne.fr/

la première législation européenne de gestion d'archives menée à l'échelle d'un pays entier. Elles sont ainsi créées sous le Directoire (Première République), par la loi du 5 Brumaire an V (26 octobre 1796), dans laquelle fut décidé que « *les administrations centrales de département feront rassembler dans le chef-lieu du département tous les titres et papiers dépendant des dépôts appartenant à la république* » (Duchein, 1979).

4.1.2.1. Série Fi - Archives figurées

Sous-série 31 Fi Cartes militaires. Canevas de tir, guerre 1914-1918

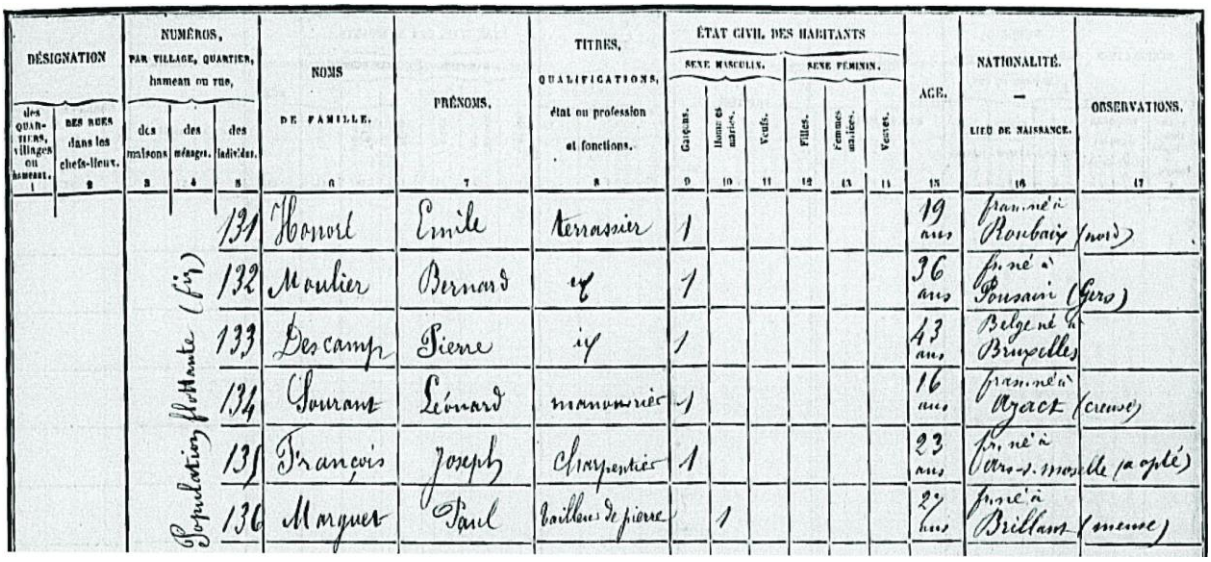
Cette cote regroupe un ensemble de 246 cartes militaires produites durant la Première Guerre mondiale par le Service géographique de l'armée, comprenant notamment des plans directeurs de tir et des groupes de canevas de tir, à des échelles comprises entre le 1/5 000 et le 1/750 000 (*cf.* partie 4.2.2.6). Elles sont disponibles au téléchargement sur le site internet des archives départementales[14].

4.1.2.2. Série M - Police et administration générale : fonds de la préfecture de la Marne (1M-202M)

Sous-série 121/122 M Dénombrement de la population (1799-1936)

La sous-série 121/122 M, relative au dénombrement de la population, est également numérisée et disponible en ligne. Elle comporte notamment les tableaux de population issus des recensements effectués tous les cinq ans pendant un siècle.

Ils prennent la forme de listes nominatives de chaque habitant, auquel est affilié des informations telles que le sexe, l'âge, l'adresse, la nationalité et la profession (fig. 4.2). L'intérêt de ces données réside dans la possibilité de saisir les caractéristiques démographiques des communes de la Marne, entre le premier tiers du XIXe siècle et 1936, et donc d'envisager l'éventuel impact démographique de la construction des fortifications autour de Reims (*e.g.*, pics démographiques, immigration professionnelle). Le recensement de 1876 constitue à ce titre un aperçu opportun, car il intervient durant la première année de construction de la première tranche de fortifications rémoises implantée sur les buttes de Berru et de Brimont (*cf.* partie 3.2.3.3 ; Durlet I., 2024).



DÉSIGNATION des quartiers, villages ou hameaux. 1	DÉSIGNATION des noms dans les chefs-lieux. 2	NUMÉROS, PAR VILLAGE, QUARTIER, hameau ou rue, des maisons 3	des ménages. 4	des individus. 5	NOMS DE FAMILLE. 6	PRÉNOMS. 7	TITRES, QUALIFICATIONS, état ou profession et fonctions. 8	ÉTAT CIVIL DES HABITANTS — SEXE MASCULIN. Garçons. 9	Hommes mariés. 10	Veufs. 11	SEXE FÉMININ. Filles. 12	Femmes mariées. 13	Veuves. 14	AGE. 15	NATIONALITÉ. — LIEU DE NAISSANCE. 16	OBSERVATIONS. 17
				131	Honoré	Emile	terrassier	1						19 ans	Français né à Roubaix	(nord)
				132	Moulier	Bernard	id	1						36 ans	Français né à Pousaux	(Gers)
				133	Descamps	Pierre	id	1						43 ans	Belge né à Bruxelles	
				134	Jouvant	Léonard	manouvrier	1						16 ans	Français né à Ajaccio	(Corse)
				135	François	Joseph	Charpentier	1						23 ans	Français né à Arros-sur-Moselle	(adopté)
				136	Marquer	Paul	Tailleur de pierre		1					22 ans	Français né à Brillant	(meuse)

Population flottante (Fr)

Figure 4.2 : Extrait du tableau de dénombrement de population de la commune de Brimont de 1876 (122 M 196). Ce type de document est notamment utilisé par Durlet I. (2024) qui étudie l'impact démographique de la construction des forts.

4.1.2.3. Série P - Finances, cadastres, postes

Sous-série 3 P Cadastre et remembrement

La série P (Finances, cadastres, postes) constitue la principale série des AD51 prospectée, notamment pour la recherche des cadastres napoléoniens (3 P) de la plupart des communes comportant des fortifications Séré de Rivières ou situées à proximité. La recherche s'est concentrée sur la récupération des plans cadastraux, entièrement numérisés et téléchargeables via un formulaire de recherche en ligne dédié[15], ainsi que sur la numérisation des états de section consultables sur place (*cf.* partie 4.2.2.3).

Sous-série 7 P Eaux et forêts (1800-1942)

En revanche, la sous-série 7 P relative aux eaux et forêts a été moins prolifique, en raison du statut privé des parcelles forestières proches des forts. Un intérêt particulier a tout de même été porté sur les rares cotes concernant les forêts privées, telles que la 7 P 256, portant sur les demandes de défrichement dans les communes de Brimont et Berru au XIXe siècle, ou la 7 P 465, relative aux dommages de guerre.

[15] https://archives.marne.fr/search/form/f3530583-c23e-4b18-9497-6fd477446b28

4.1.2.4. Série U - Justice

Sous-série 2 U Conseil de Préfecture

Les seuls documents d'archives départementales explicitement liés aux forts de Reims proviennent des archives judiciaires (série U) relatives au Conseil de préfecture (2 U). D'une part, la cote 2 U 733 rassemble des dossiers de contentieux judiciaires des années 1880 relatifs à la construction des « *forts de Berru* », incluant le fort de Witry-lès-Reims, la batterie de Berru et le fort de Nogent-l'Abbesse. Ces dossiers concernent des demandes d'indemnités formulées par des propriétaires dont les parcelles ont été réquisitionnées pour le chantier et l'extraction des matériaux. Les demandes sont adressées à l'entrepreneur ayant remporté l'adjudication des trois premiers ouvrages du Mont de Berru (Ferdinand Lancesseur), bénéficiant « *d'occupations temporaires des terrains nécessaires à l'exécution des travaux publics* » dans le cadre du décret du 8 février 1868 (annexes 6, 27 ; *cf.* partie 3.2.3.3). D'autre part, la cote 2 U 734 contient les documents judiciaires relatifs à la demande d'indemnisation formulée auprès de l'État français par les parents d'un jeune homme décédé en 1934 après avoir chuté dans le puits de 82 m du fort de Witry-lès-Reims.

Ces archives constituent des témoignages microhistoriques précieux, notamment sur les modalités de construction des forts de Reims. Les dossiers sont accompagnés de trois documents planimétriques relatifs à (fig. 4.3A-C) :

- un site d'extraction de pierre meulière associé à l'édification de la batterie de Berru, situé dans la commune de Leuvrigny (vallée de la Marne ; fig. 4.3A) ;
- la voie ferrée étroite mise en place près du fort de Nogent-l'Abbesse (fig. 4.3B) ;
- au trajet probablement emprunté par le jeune homme jusqu'au puits du fort de Witry-lès-Reims (fig. 4.3C).

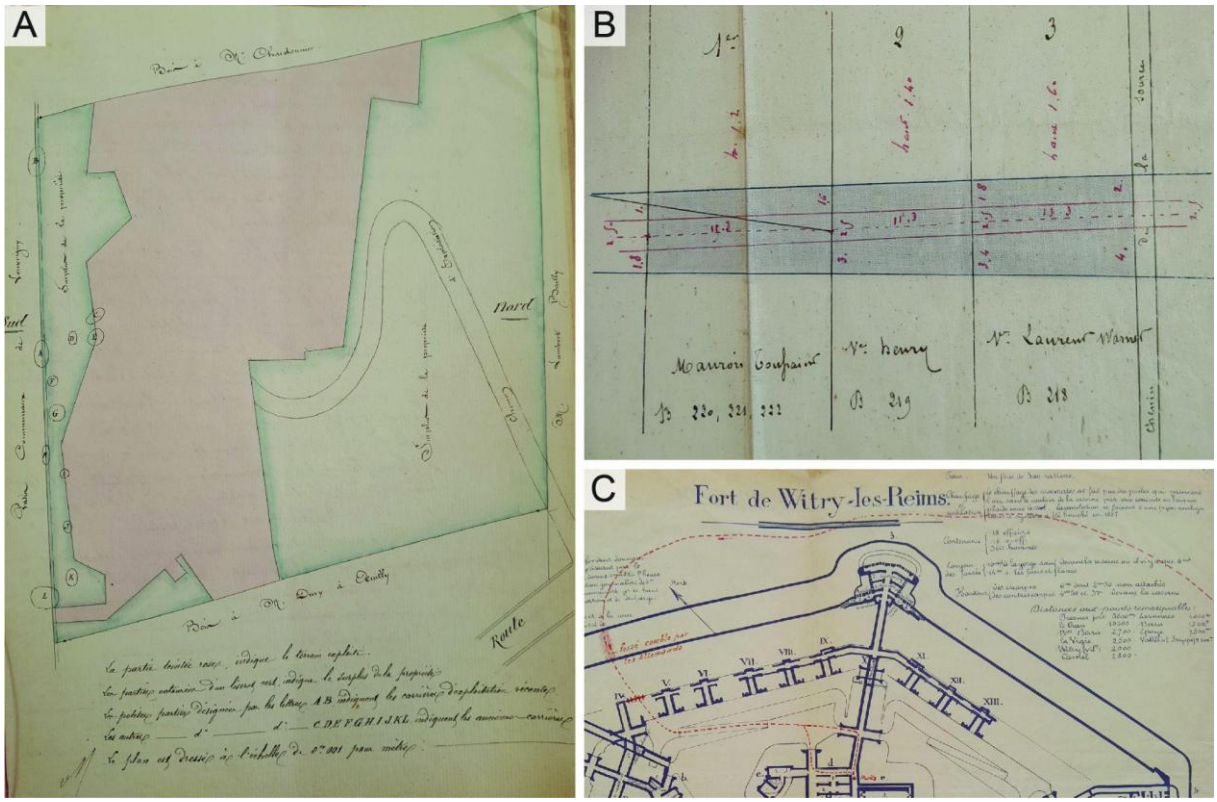


Figure 4.3 : Extraits des plans issus d'archives judiciaires relatives aux forts de Reims (2 U 733, 2 U 734). A : Reproduction du cadastre de Leuvrigny (Marne) où apparaissent les emplacements de sites d'extraction litigieux ; B : Reproduction du cadastre de Nogent-l'Abbesse (Marne) sur lequel sont représentées des parcelles litigieuses traversées par la voie ferrée construite dans le cadre de la construction du fort de Nogent-l'Abbesse ; C : Plan du fort de Witry-lès-Reims représentant l'itinéraire probable d'un jeune homme tombé dans le puits situé dans l'enceinte militaire.

4.1.3. Archives communales et fonds privés

Commune	1968	1975	1982
Chenay	255	264	291
Pouillon	305	392	458
Loivre	633	591	758
Brimont	296	335	316
Fresne-lès-Reims	293	270	329
Witry-lès-Reims	1502	1782	4674
Berru	287	296	320
Nogent-l'Abbesse	291	303	386
Puisieulx	280	240	238
Taissy	620	1879	1969

Tableau 4.3 : Évolution démographique des communes comportant au moins un ouvrage fortifié Séré de Rivières autour de Reims lors de la promulgation de la loi n° 70-1200 du 21 décembre 1970.

Le potentiel des archives communales dans la découverte de documents anciens relatifs aux fortifications Séré de Rivières est équivoque. Si d'une part la loi du 5 avril 1884 relative à l'organisation municipale oblige les communes à assurer la conservation de leurs archives, la loi n° 70-1200 du 21 décembre 1970 (remplaçant l'article 340 du code de l'administration communale relatif aux archives communales) promulgue en retour pour les communes de moins de 2000 habitants l'obligation de déposer aux archives départementales leurs archives centenaires (soit toutes les communes des forts de Reims ; **tab. 4.3**). Une vérification, menée auprès des mairies de Loivre, Nogent-l'Abbesse et

Montbré, n'a en effet donné aucun résultat, bien que l'ensemble des communes n'ait pas été exploré.

Concernant les sources privées, la principale source utilisée provient des documents accumulés par Monsieur Bernard Fouqueray, érudit local du Massif de Saint-Thierry. Architecte de formation, il a consacré une grande partie de sa vie à l'étude et à la protection des fortifications Séré de Rivières de Reims, avec un intérêt particulier pour l'architecture militaire. Son fonds d'archives comprend des manuscrits, des reproductions de documents d'archives, des reportages photographiques des forts, des notes de recherche, ainsi que des publications couvrant une large gamme de sujets relatifs à l'histoire, l'architecture militaire, l'archéologie et la fortification.

L'un des apports majeurs de ce fonds pour cette thèse réside dans l'accès à une littérature grise spécifique aux fortifications Séré de Rivières (fascicules d'associations, livres autoédités, *etc.*). Parmi les sources les plus emblématiques figurent les ensembles bibliographiques de Monsieur Pierre Richard, spécialiste de la fortification ayant autoédité plusieurs ouvrages sur la conception et le fonctionnement de ces ouvrages (*e.g.*, Richard, 1998, 1999, 2001). Un autre apport essentiel réside dans les matrices de publication élaborées par Monsieur Fouqueray pour son livre « *Le système fortifié Séré de Rivières à Reims (1874-1914)* », commencé dans les années 1990 et enrichi à trois reprises jusqu'en mai 2003, sans n'avoir jamais été publié (Fouqueray, 2003).

Les sources secondaires privées incluent des collections personnelles, comme les fonds cartographiques et documentaires de Messieurs Vincent Piniarski et Alexandre Herreman, relatifs à la Première Guerre mondiale ainsi que ceux de Messieurs Jean-Paul Batteux et Bruno Wysocinski, ou les documents conservés par l'AAFNA.

L'exploitation des sources archivistiques, qu'elles soient publiques ou privées, permet ainsi d'éclairer les contextes historiques de production et de transformation des ouvrages. Elles demeurent toutefois inégalement distribuées, fragmentaires et rarement directement spatialisables. Ces limites rendent nécessaire le recours à des jeux de données cartographiques et géoréférencés permettant de documenter de manière homogène la configuration spatiale du territoire.

4.2. Banques de données cartographiques, planimétriques, photographiques

Cette section présente les principales BD cartographiques, planimétriques et photographiques mobilisées dans ce travail. Ces référentiels constituent le socle spatial de l'analyse, en assurant à la fois la description multiscalaire du territoire et l'intégration des données LiDAR dans un environnement SIG cohérent.

4.2.1. Banques de données géoréférencées préexistantes

L'étude des fortifications Séré de Rivières a impliqué l'utilisation de BD publiques nationales préexistantes, vecteurs et rasters, reconnues pour leur fiabilité et leur exhaustivité dans le domaine des SIG (tab. 4.4). Ces dernières, sélectionnées pour leur adéquation avec les objectifs de cette thèse, ont servi à décrire le territoire et ont été croisées aux données LiDAR dans le cadre de la réalisation des inventaires des anomalies topographiques.

BD	Producteur	Fournisseur	Mode	Catégorie
ADMIN EXPRESS	IGN	IGN	Vecteur	Limites administratives
PARCELLAIRE EXPRESS (PCI)	IGN, DGFIP	IGN	Vecteur	Limites administratives
BD TOPO®	IGN	IGN	Vecteur	Occupation du sol et infrastructures
OCS GE	IGN	IGN	Vecteur	Occupation du sol
CoSIA	IGN	IGN	Vecteur	Occupation du sol
CORINE LAND COVER	IGN, SDES	Copernicus	Vecteur	Occupation du sol
BD ORTHO®	IGN	IGN	Raster	Occupation du sol
BD ORTHO® Historique	IGN	IGN	Raster	Occupation du sol ancienne
SCAN 25®	IGN	IGN	Raster	Occupation du sol
SCAN 50® Historique	IGN	IGN	Raster	Occupation du sol
BD Charm-50	BRGM	BRGM	Vecteur	Géologie
Données spatiales écologiques	INPN	INPN	Vecteur, Raster	Écologie, Patrimoine naturel
BD FORÊT® V2	IGN	IGN	Vecteur	Formations végétales
BD ALTI®	IGN	IGN	Raster	Altitude
RGE ALTI®	IGN	IGN	Raster	Altitude

Tableau 4.4 : Liste des banques de données publiques nationales utilisées.

Une exception réside dans l'emploi de la BD Tranchées, créée au sein du GEGENA dans le cadre du programme IMPACT 14-18 et de la thèse de Taborelli (2018), qui n'est pas diffusée publiquement. Ces données résultent de la digitalisation de l'ensemble des informations militaires mentionnées sur les plans directeurs des GCTA sur le front champenois (*c.* 115 km ; *cf.* partie 4.2.2.6). Au total, plus de 10 000 km de tranchées ont été digitalisées de manière simplifiée (traverses et créneaux non pris en compte), puis croisées à des indices de sinuosités (tranchée, 1,36 ; boyau, 1,1) déterminés à partir des archives militaires (Ministère de la Guerre, 1917 ; Devos et al., 2015), aboutissant à un linéaire d'environ 13 000 km.

4.2.1.1. Banques de données vectorielles

4.2.1.1.1. Limites administratives et occupation du sol (vecteur)

Les BD publiques nationales s'organisent en plusieurs thématiques principales. Les données administratives d'ADMIN EXPRESS de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) fournissent une cartographie précise et détaillée des limites administratives en France, incluant les communes, cantons, arrondissements, départements, régions et intercommunalités. Elle est complétée à l'échelle de la parcelle cadastrale française du PARCELLAIRE EXPRESS issu du plan cadastral informatisé (PCI), coproduite par la Direction générale des Finances publiques (DGFiP).

Les données d'occupation du sol mobilisées dans cette étude proviennent de l'OCS GE (occupation du sol à grande échelle) de l'IGN. Cette BD est produite par intelligence artificielle à partir du croisement des BD ORTHO®, Forêt® et TOPO®, de modèle numérique d'élévation (MNE) et du Registre parcellaire graphique (RPG ; IGN, 2025b). Elle est devenue le référentiel national pour l'occupation du sol, décrivant le territoire métropolitain français en 14 classes de couverture du sol (CS) et 20 classes d'usage (US), avec une résolution de 20 cm, une correction manuelle par photo-interprétation et l'application de seuils de surface aux polygones. La production régulière de millésimes (un tous les trois ans) doit notamment contribuer à l'objectif de Zéro Artificialisation Nette (ZAN) à l'horizon 2050 fixé par la loi « Climat et résilience » du 22 août 2021. L'OCS GE est étroitement articulée aux cartes CoSIA, produites exclusivement par apprentissage profond. Celles-ci interviennent en amont de la chaîne de production et se caractérisent par une précision géométrique élevée des contours, au prix d'un taux d'erreur encore important lié à l'absence de correction manuelle (fig. 4.4).

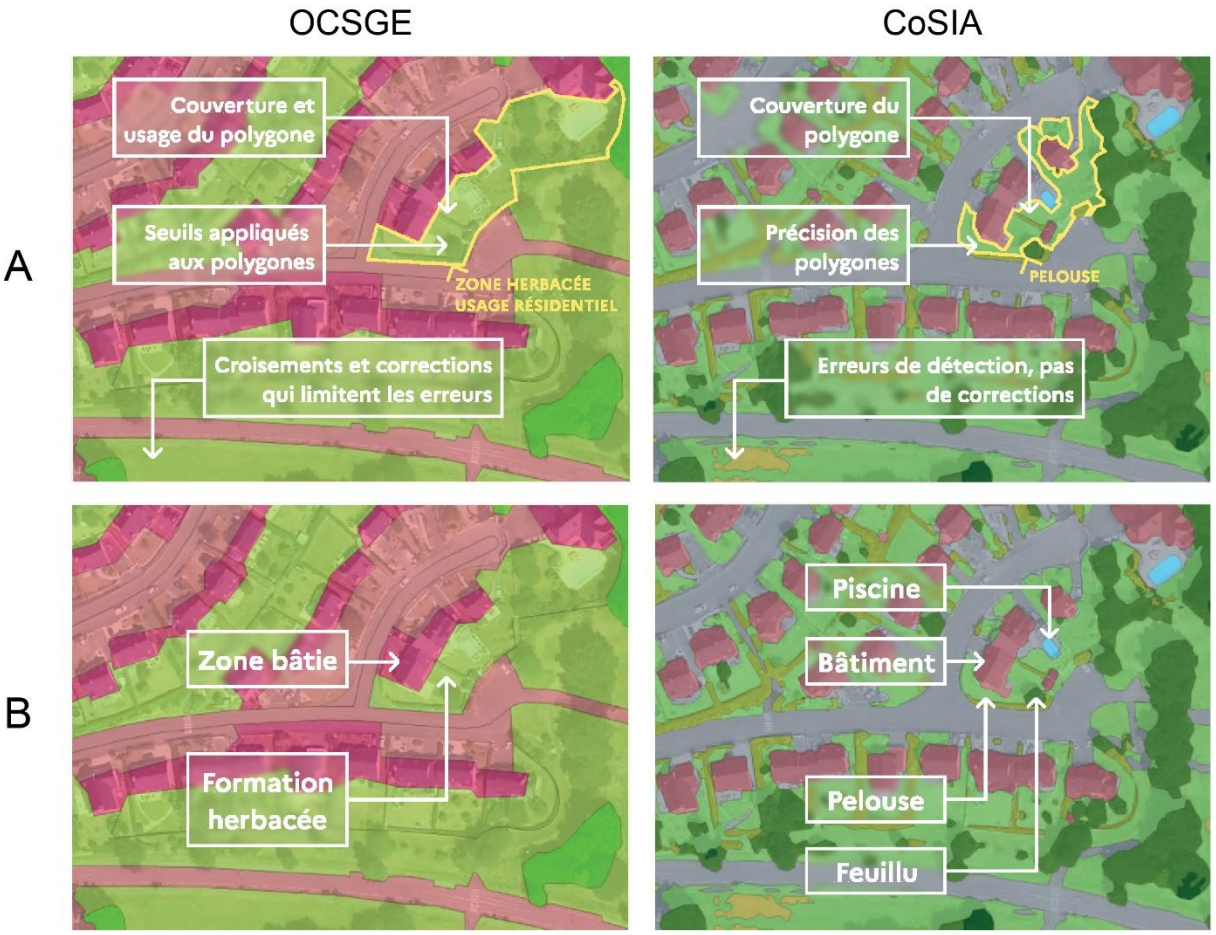


Figure 4.4 : Comparaison de l'OCS GE et de CoSIA (d'après IGN, 2023a). A : Exemple de classification, OCS GE produit une classification plus fiable mais moins fine spatialement ; B : Exemple de classification, CoSIA produit une classification plus fine spatialement et thématiquement.

Ces données tendent à supplanter en France l'utilisation de la BD CORINE Land Cover produite à l'échelle européenne dans le cadre du programme Copernicus de l'Agence européenne pour l'environnement. Le millésime le plus récent de cette BD, exploité ponctuellement dans la thèse, date de 2022 et propose une description déclinée en 44 types d'occupations pour des espaces inférieurs à 25 ha.

En plus de l'occupation du sol et de l'administratif, la BD TOPO® de l'IGN agrémente la connaissance des éléments et infrastructures géographiques nécessaire à « *l'analyse et la gestion opérationnelle du territoire* », constituant à ce titre « *le socle nécessaire au fonctionnement des systèmes d'information des collectivités locales de la commune à la région* » (IGN, 2025a).

4.2.1.1.2. Géologie, foresterie, écologie (vecteur)

Les données utilisées proviennent enfin de BD thématiques environnementales, géologique, forestière et écologique, indispensables à l'étude géomorphologique et biogéographique des fortifications de Reims.

La BD Charm-50 correspond à la carte géologique de la France vectorisée et harmonisée à partir des plans au 1/50 000 réalisés à partir des années 1970. La couche polygonale des formations géologiques a été utilisée afin d'étudier la ceinture fortifiée située dans l'emprise des feuilles d'Asfeld-la-Ville (butte de Brimont ; Pomerol, 1975), de Fismes (Massif de Saint-Thierry ; Laurain et al., 1976), et de Reims (Champagne sèche et butte de Berru ; Laurain et al., 1981), ainsi que, pour documenter le contexte géologique de la Montagne de Reims, à partir de la feuille d'Avize (Laurain, 1986). Chaque feuille est accompagnée d'une notice explicative où est adoptée une perspective environnementale et naturaliste détaillant les caractéristiques de chaque formation géologique rencontrée, les ressources minéralogiques potentielles, ainsi que la nature des sols et la végétation associée, parfois agrémentée d'informations archéologiques (*e.g.*, la feuille de Reims ; Laurain et al., 1981).

La BD Forêt® v2, mise à disposition par l'IGN, constitue une cartographie fine des massifs forestiers et des peuplements via la photo-interprétation des photographies aériennes IRC (infrarouges couleur ; IGN, 2018a). Cela aboutit à la classification de 32 types de formations végétales de plus de 0,5 ha situés en France métropolitaine Chaque type de formation est décrite par un code (code TFV) qui se décline en quatre niveaux hiérarchiques relatifs (I et II) à la couverture du sol (forêt, landes, peupleraie) et à la densité du couvert (forêt fermée ou ouverte), (III) à la composition majoritaire (composition non discriminée, mélanges de feuillus ou conifères, ou peuplements purs, *etc.*) et (IV) à la composition prépondérante, attribuant une information spécifique (hêtre, chêne, robinier, pins, sapin, *etc.*).

Dans le cadre de cette thèse, les données du département de la Marne, publiées en 2020 à partir de l'interprétation des orthophotographies IRC de 2016, contribuent à l'évaluation des dynamiques de recolonisation forestière autour des forts Séré de Rivières, à la caractérisation des formations végétales et à l'exploration des implications de la végétation dans la stabilité des structures.

Différentes données géographiques à vocation écologique ont été utilisées en complément. Elles émanent d'une multiplicité d'acteurs, centralisés par l'Inventaire national du patrimoine naturel (INPN)[16], lequel informe en particulier concernant :

- les espaces protégés à l'échelle nationale (arrêtés de protection, parcs naturels nationaux et régionaux, réserves de biosphère, biologiques et naturelles, *etc.*) et européenne (Natura 2000) ;

[16] Inventaire national du patrimoine naturel (INPN), Muséum national d'Histoire naturelle, consulté le 20 novembre 2024, accessible à : https://inpn.mnhn.fr/ (services interrompus depuis l'été 2025 à l'issue d'une cyberattaque à l'encontre du Muséum national d'Histoire naturelle.

- les ZNIEFF de type I et II ;

- les trames et réseaux favorisant la continuité écologique (dont la trame verte et bleue, TVB) ;

- les habitats naturels et semi naturels (CarHab), non utilisés dans ce travail.

4.2.1.2. Banques de données raster

4.2.1.2.1. Écologie, topographie (raster)

Un ensemble de BD rasters publiques complètent ce premier ensemble. Sur la thématique écologique, le projet CartNat propose des couches raster évaluant le degré de naturalité potentielle en France métropolitaine, basées sur trois critères (Guetté et al., 2018) : l'intégrité biophysique de l'occupation du sol, la spontanéité des processus (degré d'anthropisation) et les continuités spatiales (connectivité des milieux). Ces données écologiques sont utilisées pour interroger la place des fortifications de Reims dans les enjeux écologiques contemporains (fig. 3.20, 3.21).

Les banques de données altitudinales de l'IGN représentent une autre source clé pour cette thèse. Le RGE ALTI®, visant à produire un MNT de 1 m pour l'ensemble du territoire métropolitain, repose sur l'interpolation des données LiDAR aéroportées et la corrélation d'orthophotographies (IGN, 2018b). La BD ALTI®, issue du RGE ALTI® et produite à une résolution de 25 m, a été utilisée pour des représentations cartographiques à moyenne échelle (IGN, 2017). Dans ce travail, le RGE ALTI® a été spécifiquement mobilisé pour l'analyse géomorphologique du fort de la Pompelle, car il correspond dans ce secteur à une acquisition LiDAR d'une résolution de 1 m réalisée sur le corridor fluvial de la Vesle, ayant permis une première lecture morphologique du site lorsque le LIDAR HD n'était pas encore publié. Les données LIDAR HD, correspondant également à une BD publique mise à disposition par l'IGN, sont abordées dans une sous-partie indépendante dédiée à la méthode d'exploitation des données LiDAR à vocation archéogéomorphologique, qui constitue le cœur de la thèse (*cf.* partie 4.3).

4.2.1.2.2. Occupation du sol (raster)

Sur la thématique de l'occupation du sol, enfin, les cartes topographiques des années 50 (SCAN 50® Historique) et actuelle (SCAN 25®), ainsi que les orthophotographies, proposées par l'IGN, constituent des sources incontournables (fig. 4.5A-D). Les données SCAN 25® version 3.1 (2021) ont ainsi été intégrées à cette étude pour leur grande précision géométrique et leur compatibilité avec les autres données géographiques (*e.g.*, BD TOPO®, BD ORTHO®). Ces cartes numériques en couleurs, issues du fonds cartographique au 1/25 000, fournissent un support cartographique cohérent, à la fois

précis et actualisé, essentiel pour l'analyse des paysages militaires et des structures fortifiées, constituant notamment une base potentielle pour le géoréférencement des cartes anciennes.

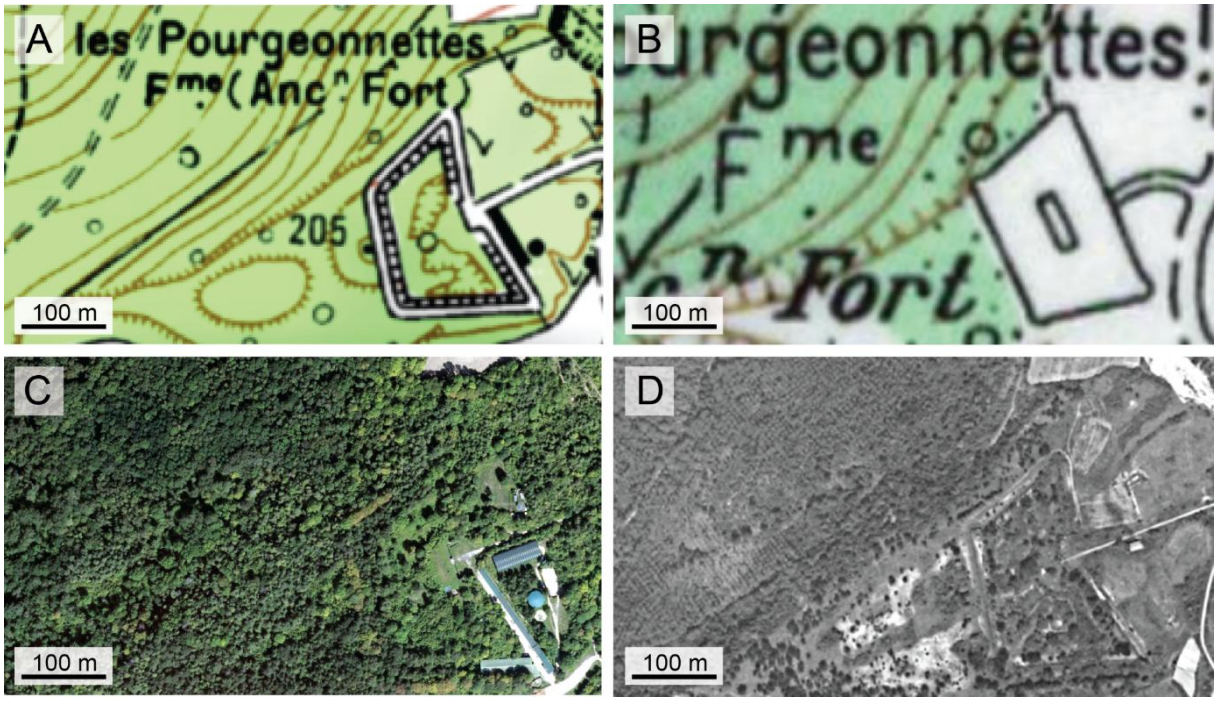


Figure 4.5 : Secteur du réduit de Chenay selon les banques de données raster de l'IGN utilisées. A : SCAN 25® ; B : SCAN 50® Historique ; C : BD ORTHO® ; D : BD ORTHO® Historique.

Le SCAN 50® Historique rassemble des images cartographiques numériques issues du scannage des éditions historiques des cartes au 1/50 000. Elles conservent la précision géométrique des documents d'origine, avec une résolution de 5 m, permettant un usage jusqu'au 1/25 000 (IGN, 2023b). La ceinture fortifiée de Reims est couverte par quatre feuilles éditées entre 1948 et 1956 (2711, 2712, 2811, 2812) correspondant au « type 1922 » (fig. 4.6).

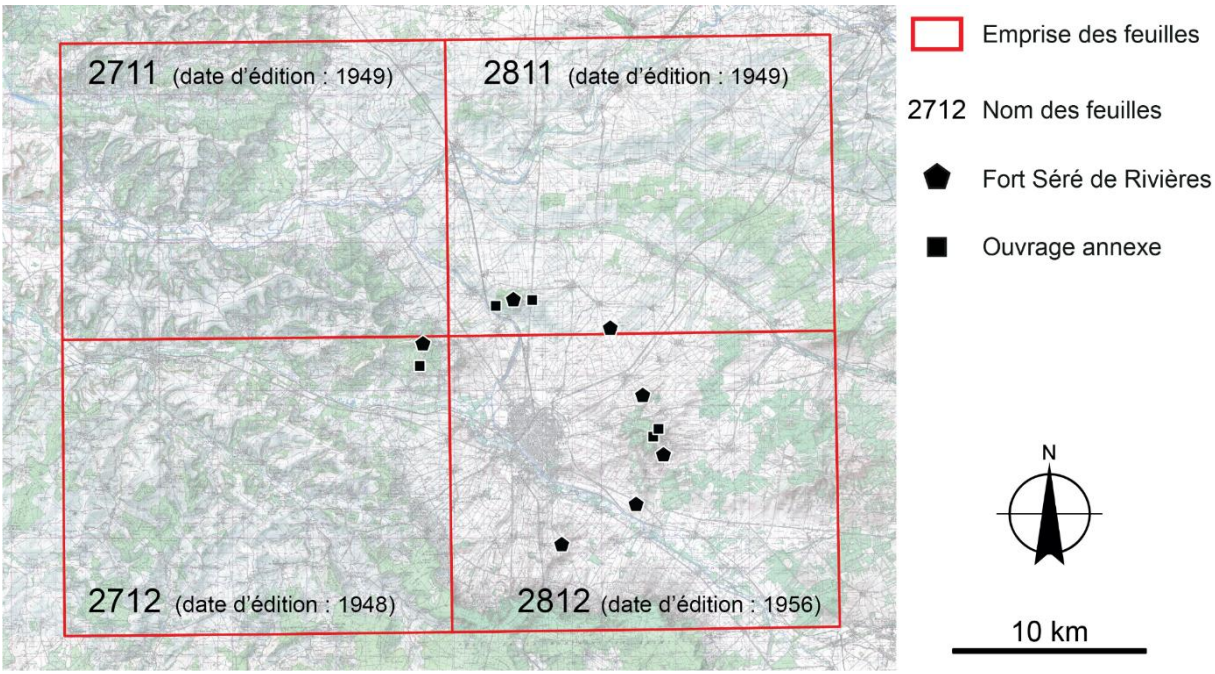


Figure 4.6 : Tableau d'assemblage du Scan 50® historique type 1922 (IGN).

Les premières réflexions autour d'une carte nationale au 1/50 000 remontent à la fin du XIXe siècle, mais c'est en 1922 qu'une véritable mise en œuvre débute, avec l'adoption d'une charte graphique rénovée et de la projection Lambert (Type 1922). Cette série, publiée de 1922 à 2010, couvre progressivement l'ensemble du territoire, avec une homogénéisation marquée dans les années 1950-1970, période constituant le cœur du corpus numérisé par l'IGN (Arnaud, 2022d).

La charte graphique comprend cinq couleurs (Arnaud, 2022d) : « *le noir pour la planimétrie, les écritures et l'habillage, le bleu pour l'hydrographie et les sables humides, le vert surchargé de poncifs (semis de signes conventionnels) noirs pour […] les bois, le bistre pour les courbes de niveau et les sables secs, le gris pour l'estompage* ». Les milieux ouverts, correspondant généralement à des espaces agro-pastoraux, sont représentés en blanc, en contraste de tous ces éléments.

En parallèle, deux BD orthophotographiques publiques géoréférencées ont été sélectionnées pour leur résolution et leur accessibilité : la BD ORTHO® 50 cm (2019) et la BD ORTHO® Historique 50 cm (2016) publiées par l'IGN (fig. 4.5C-D). La première, obtenue par l'intermédiaire du service WMS du géoservice de l'IGN, propose des clichés pris en 2019. Pour la seconde, les dalles utilisées pour l'étude des forts de Reims ont été extraites de la BD du département de la Marne disponible au téléchargement depuis le catalogue du même site, qui correspond à des clichés pris en 1949. Cette dernière bénéficie de traitements radiométriques visant à uniformiser les clichés en corrigeant les zones de surbrillance, le vignettage et les contrastes. Les images rectifiées sont assemblées en

mosaïque afin d'assurer une continuité visuelle, malgré des dissemblances liées aux limites géométriques (orientation, MNT) et radiométriques (voile, saison, ensoleillement ; IGN, 2021).

Ces référentiels publics, vectoriels et raster, ont été complétés par la création de BD spécifiques, issues du géoréférencement et de la vectorisation de documents cartographiques anciens, afin de permettre leur intégration cohérente dans l'environnement SIG et leur exploitation diachronique.

4.2.2. Banques de données cartographiques et planimétriques créées

En complément des BD publiques, qui couvrent les époques les plus récentes, des documents cartographiques anciens ont été mobilisés pour l'étude paysagère de la ceinture fortifiée de Reims. Ils couvrent quatre grandes périodes (tab. 4.5) :

- seconde moitié du XVIIIe siècle : plans terriers, carte de Cassini, Atlas de Guettard et Monnet ;

- premier tiers du XIXe siècle, notamment 1825-1835 : carte d'État-Major, cadastre napoléonien ;

- décennie de construction de la ceinture de Reims (1875-1885) : Atlas de Poinsignon et Atlas du département de la Marne, Plan des Environs de Reims du Génie, Carte de l'arrondissement de Reims ;

- Première Guerre mondiale : plans directeurs des GCTA, carte spéciale des régions dévastées ;

La précision de ces sources décroît avec l'ancienneté. Les cartes du XVIIIe siècle, fortement marquées par la subjectivité des ingénieurs-cartographes, offrent avant tout une lecture contemporaine du paysage (Crozet et al., 2017).

L'Atlas de Trudaine (décennies 1740-1770 ; 1/8600), dédié à la documentation de l'état des voies de circulation sous Louis XV (Blond, 2009), n'a pas été retenu. Très peu de forts sont en effet situés à moins de 600 toises (1 170 m) de la « *Route de Paris à Mézières par Fismes et Reims »,* c'est-à-dire au sein de la bande cartographiée de part et d'autre des voies royales (annexe 36 ; Combaud et al., 2016).

À l'exception des cartes de Cassini, de Guettard et du cadastre napoléonien, les documents utilisés sont des cartes topographiques, représentant conjointement le relief, la végétation, l'hydrographie, les aménagements humains, les réseaux de communication et les limites administratives. Certaines sources comportent en outre des informations spécifiques liées à leur finalité (*e.g.*, militaire, scientifique, administration et contrôle du territoire).

Carte *Map*	Échelle *Scale*	Feuille *Sheet*	Édition, lever *Production, survey*	Source
Carte de Cassini	1/86 400	Soissons n°44	1757 (L)	IGN
		Rheims n°79		
Atlas de Guettard	1/86 400	Sainte-Mennehoud - Machaut - Suippe	1780 (E)	MPT
		Valois - Soissonnois - Rhemois et pays adjacents		
Cadastre napoléonien	1/1 250	Hermonville, TA, E2-E3	1813 (E)	AD51
		Chenay, TA, Au	1814 (E)	
		Taissy - TA, B1-B2	1819 (E)	
		Montbré - TA, A2-A3	1830 (E)	
		Puisieulx - TA, A1-A2		
		Brimont - TA, Au, A1, B1-B4, C1-C2, D1, E1	1834 (E)	
		Courcy - TA, A1-A2		
		Prunay, TA, E1	1835 (E)	
		Nogent-l'Abbesse - TA, G1-G3		
		Berru - TA, F3, G1		
		Witry-lès-Reims - TA, F3, G1		
		Fresne - TA, B3, Cu, D2		
		Loivre - TA, C1-C3		
		Pouillon- TA, A1		
Carte d'État-Major	1/40 000	Reims NE, NO, SE, SO	1825-1826 / 1831 (L)	IGN
Atlas de Poinsignon	1/80 000	Canton de Beine	1874, 1878 (E)	BNF CERHIC
		Canton de Reims	1874, 1877 (E)	
		Canton de Bourgogne	1875, 1876 (E)	
Atlas départemental des Ponts et Chaussées et Services Vicinaux	1/50 000	Canton d'Ay	1876, 1878 (E)	
		Canton de Fismes		
		Canton de Verzy	1877, 1878 (E)	
		Canton de Ville-en-Tardenois		
		Canton de Châtillon	1878, 1877 (E)	
Plan du Génie	1/20 000	Environs de Reims	1877 (L)	SHD
Carte de France du Service Vicinal	1/100 000	Arrondissement de Reims	1884 (E)	BNF

Carte *Map*	Échelle *Scale*	Feuille *Sheet*	Édition, lever *Production, survey*	Source
Plan directeur des GCTA	1/20 000	Beine	10/08/1918 (E)	AD51, SHD
		Berry-au-Bac	28/09/1918 (E)	
		Brimont	01/04/1915 (E)	
			20/04/1918 (E)	
			28/10/1917 (E)	
		Feuille n°8	01/11/1915 (E)	
		Fismes	22/06/1918 (E)	
		Jonchéry	23/09/1918 (E)	
		Reims	06/10/1918 (E)	
	1/10 000	Berru SE	29/04/1917(E)	
		Berru SO		
		Brimont SE	25/03/1917 (E)	
		Brimont SO	05/04/1918(E)	
		Jonchéry NE	28/01/1918 (E)	
		Reims NE	17/05/1918 (E)	
		Reims SE	22/03/1918 (E)	
	1/5 000	La Pompelle	25/03/1917 (E)	
			17/02/1918 (E)	
Stellungskarte	1/25 000	Berry-au-Bac	16/06/1918	AAFNA, MFP
		Brimont	13/06/1917 (E)	
		Brimont west	16/06/1918	
		Reims	15/10/1916 (E)	
			01/11/1916 (E)	
			19/06/1918 (E)	
	1/5 000	Pompelle	16/12/1917 (E)	
Carte spéciale des régions dévastées	1/50 000	Reims NO	01/12/1920 (E)	BNF
		Reims SO		
		Reims SE		
Carte géologique	1/50 000	Asfeld-la-Ville	1975	BRGM, IGN
		Fismes	1976	
		Reims	1981	

Tableau 4.5 : Liste des documents cartographiques et planimétriques employés (hors cartes topographiques IGN).

Le rôle structurant de l'armée dans la cartographie française apparaît ainsi clairement à travers la carte d'État-Major, élaborée par le Dépôt de la guerre, le plan des environs de Reims réalisé par le Génie, les plans directeurs des GCTA et les *Stellungskarten* allemandes élaborés pendant la Grande Guerre (tab. 4.6).

Les sections suivantes présentent l'origine, l'histoire, les caractéristiques et les apports propres à chaque document (tab. 4.5). Les méthodes de géoréférencement sous SIG ne sont détaillées que dans la partie 4.3.3.1, en raison de leur articulation avec les données LiDAR aéroportées, dans le cadre de l'optimisation et de l'interprétation des anomalies topographiques.

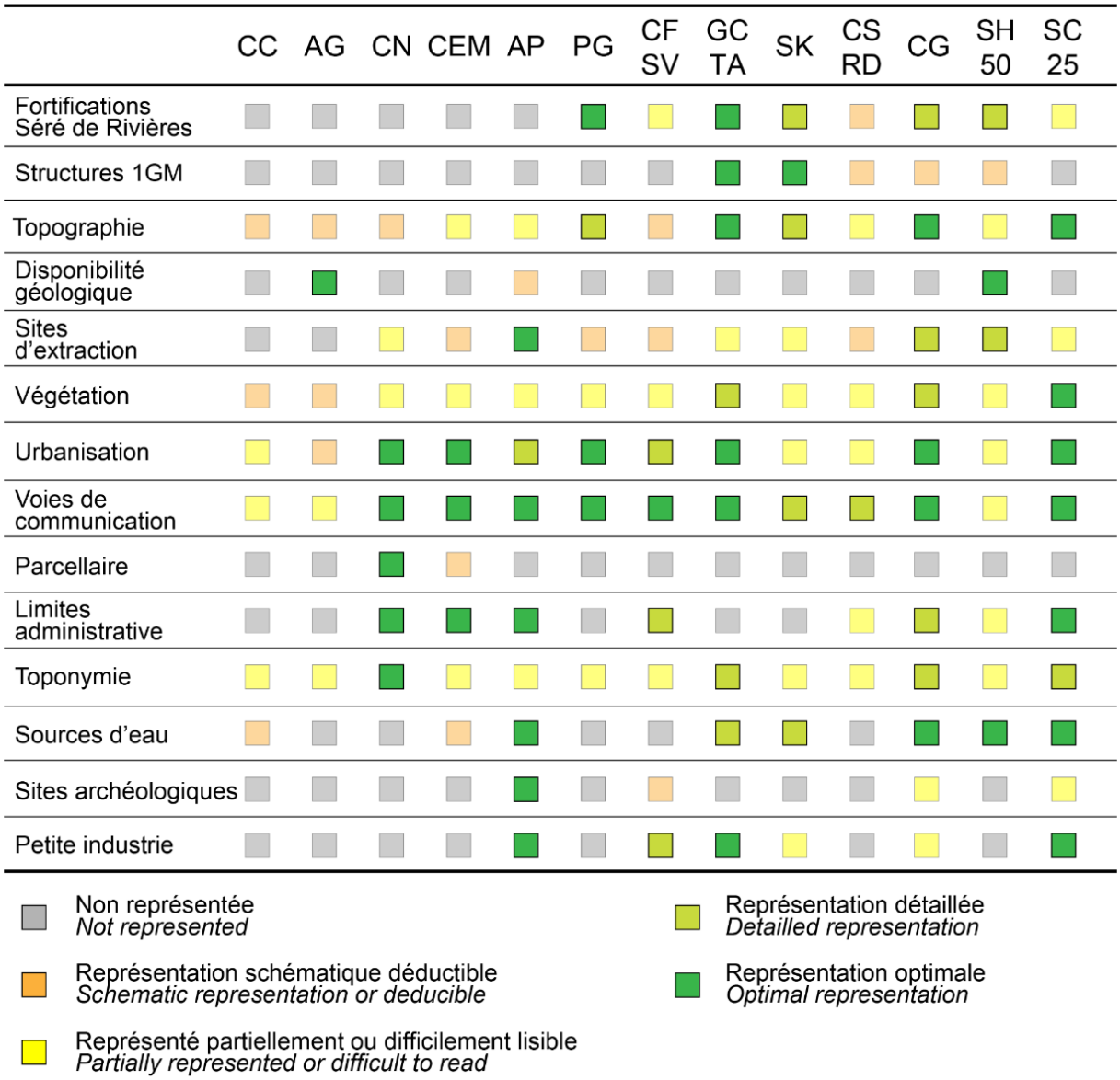


Tableau 4.6 : Potentiel d'information des documents cartographiques employés par type d'information. CC : Carte de Cassini (1740) ; AG : Atlas de Guettard (1780) ; CN : Cadastre napoléonien (1814-1835) ; CEM : Carte d'État-Major (1825-1826/1831) ; AP : Atlas de Poinsignon (1874-1878) ; PG : Plan du Génie (1877) ; CFSV : Carte de France du Service Vicinal (1884) ; GCTA : Plan directeur des GCTA (1915-1918) ; SK : *Stellungskarte* (1916-1918) ; CSRD : Carte spéciale des régions dévastées (1920) ; SH50 : SCAN 50® Historique IGN (années 1950) ; CG : Carte géologique du BRGM (1975-1981) ; SC25 : SCAN 25® IGN v.3.1 (2021).

4.2.2.1. Carte de Cassini

La Carte dite « de Cassini » (fig. 4.7A), commandée par Louis XV, porte le nom de son maître d'œuvre principal, César-François Cassini de Thury (Cassini III), troisième d'une lignée de quatre géographes et astronomes se succédant à la tête de l'Observatoire de Paris. Il s'agit de la première représentation cartographique de la France (et par là même, de la première grande enquête toponymique nationale), qui couvre 96 % du territoire national actuel (Vallauri et al., 2012). Elle est diffusée via 180 feuilles levées entre 1749 et 1789 (moyenne pondérée par la surface levée établie à 1765) et publiées entre 1756 et 1815. Elle vise, selon Cassini III, à « *mesurer le Royaume, c'est-à-dire déterminer le nombre innombrable de bourgs, villes et villages semés dans toute son étendue* » à une échelle de 1/86 400, soit 1 pouce pour 100 toises.

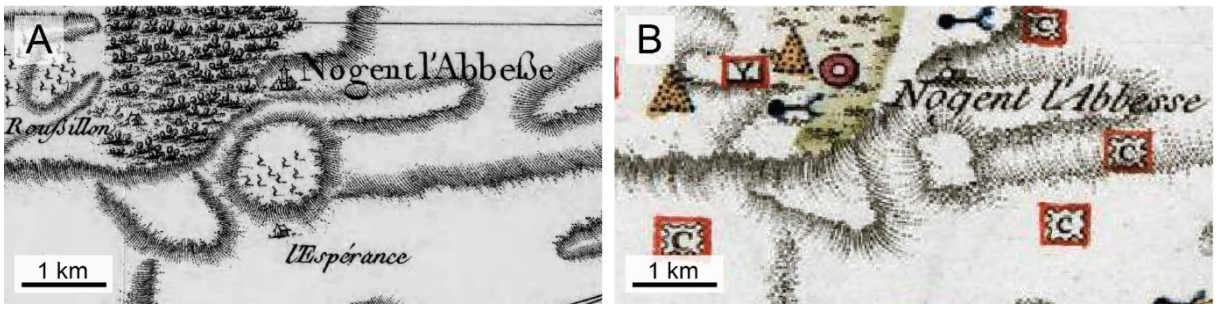


Figure 4.7 : Documents cartographiques datant du XVIIIe siècle utilisés dans l'étude du paysage de guerre rémois et des fortifications Séré de Rivières. A : Carte de Cassini (1/86 400) ; B : Atlas de Guettard (1/86 400)

Vallauri et al. (2012) proposent une analyse critique de l'utilisation de ce document dans l'étude de l'ancienneté de l'état boisé, rappelant notamment :

- le caractère schématique de la représentation forestière, réalisée le plus souvent par observation depuis les clochers, sur la base d'informations de notables ou à partir de plans locaux plus anciens, Cassini de Thury (1754) priorisant « *[...] la distinction des Pays de montagnes aux Pays unis [de plaine], [qui] font la partie la plus essentielle & la plus utile de la représentation d'une Carte* » ;

- la non-représentation des petites clairières et des boisements de faible superficie, souvent inférieurs à 20 ha, parfois jusqu'à 100 ha (Rochel et al., 2017a) ;

- une sous-représentation systématique de la surface forestière à l'échelle nationale, estimée à au moins 4 % en valeur absolue par comparaison avec le cadastre napoléonien. La surface boisée au milieu du XIXe siècle est considérée comme largement inférieure à celle représentée sur les cartes de Cassini du fait des nombreux défrichements des périodes pré-révolutionnaire (Devèze, 1966) et révolutionnaire (Woronoff, 1989).

Les auteurs recommandent en conséquence d'éviter l'analyse à une échelle trop fine (infra-départementale) et de privilégier l'usage de cette source pour l'identification de grands noyaux forestiers anciens et des grandes lignes du paysage (*e.g.*, Ancelin et al., 2025), plutôt que pour l'estimation précise de catégories d'occupation du sol. Les feuilles de Soissons (levée en 1750) et Reims (1757 ; fig. 4.8), proposent une esquisse du paysage rémois un siècle avant la phase de militarisation de la fin du XIXe siècle. Elles constituent la référence cartographique de base de l'approche géohistorique compte tenu de son accessibilité[17] et de l'existence d'une BD vectorielle représentant la plupart des informations planimétriques (Perret et al., 2015).

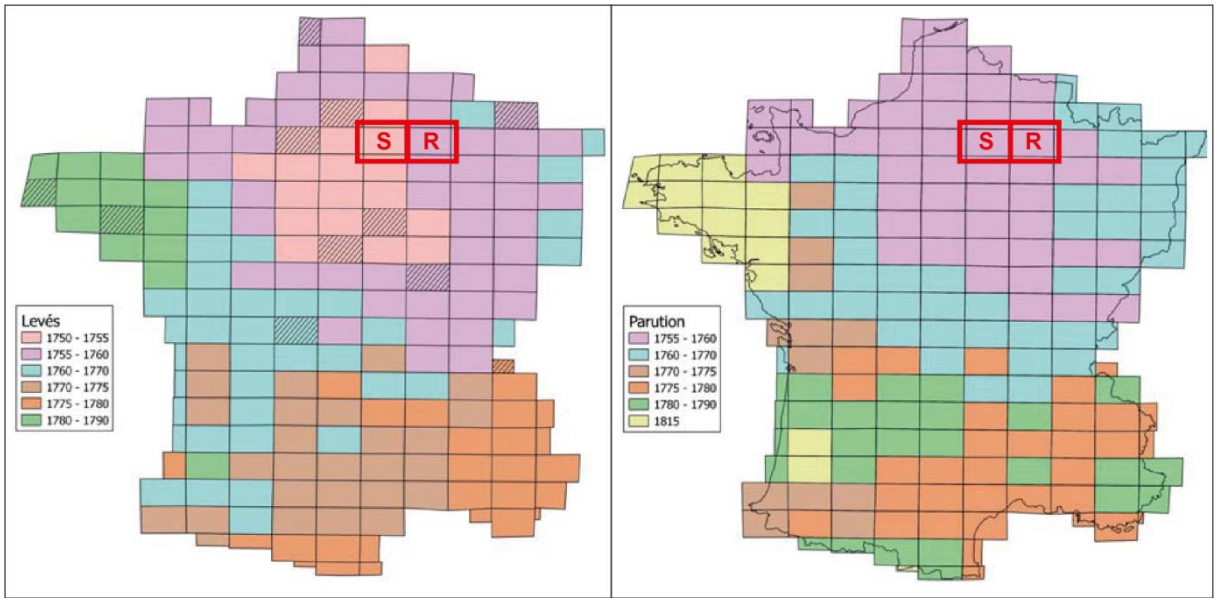


Figure 4.8 : Date de levé (à gauche) et de publication (à droite) des feuilles de la carte de Cassini (Vallauri et al., 2012). Les dates de levé des feuilles hachurées ne sont pas connues avec exactitude et ont été estimées à partir d'informations diverses. Les feuilles de Reims (R) et Soissons (S) sont encadrées en rouge.

4.2.2.2. Atlas de Guettard

L'atlas de Guettard et Monnet (1780) constitue, en quelque sorte, une mise à jour géologique de la Carte de Cassini (fig. 4.7B), en ce sens qu'il propose un aperçu des ressources en géomatériaux par l'intermédiaire de l'un des premiers inventaires géologiques modernes (Fronteau et Lelarge, 2022). Cela passe par la réalisation de plus de 40 cartes comportant des logs géologiques et représentant la nature du sous-sol par l'intermédiaire d'entités cartographiques ponctuelles. Un « *mémoire contenant la description du terrain, des pierres et des fossiles de la Champagne et des Provinces qui l'avoisinent* » (p. 435-494) est rédigé en complément.

[17] (Gallica, Remonter le temps)

Le secteur de la ceinture fortifiée de Reims se situe à l'intersection de deux feuilles levées dans les années 1760 et géoréférencées à titre indicatif. Aucune BD vectorielle n'a été créée sur leur base du fait des inconvénients pointés par Fronteau et Lelarge en 2022, en partie liés au fonds cartographique de Cassini (distorsions spatiales, qualité et quantité fluctuantes de l'information, vocabulaire obsolète).

4.2.2.3. Cadastre napoléonien

Le cadastre napoléonien est levé de 1807 à 1850 afin d'organiser la nouvelle fiscalité foncière parcellaire entérinée par la loi du 15 septembre 1807. Il témoigne de l'émergence d'un renouveau cartographique en France via l'instauration d'une « langue topographique » commune uniformisant les règles, encore utilisée aujourd'hui (Bartout, 2011) : normalisation des signes, mesure des points cotés à partir du niveau de la mer, utilisation d'échelles métriques décimales, unités des projections utilisées. Pour chaque commune française, le cadastre napoléonien se décline en quatre types de documents (fig. 4.9A-D ; Rochel et al., 2017a) :

- un tableau d'assemblage, généralement au 1/10 000 autour de Reims, donnant les délimitations des différentes sections (fig. 4.9A) ;

- des plans parcellaires de chaque section, généralement au 1/1 250 dans le Pays rémois (fig. 4.9B) ;

- des états de section, associant à chaque parcelle des informations relatives au propriétaire (nom, prénom, profession, lieu de résidence), à la surface, à l'usage du sol et à la fiscalité (fig. 4.9C-D) ;

- des matrices des propriétés bâties et non bâties enregistrant les mises à jour postérieures.

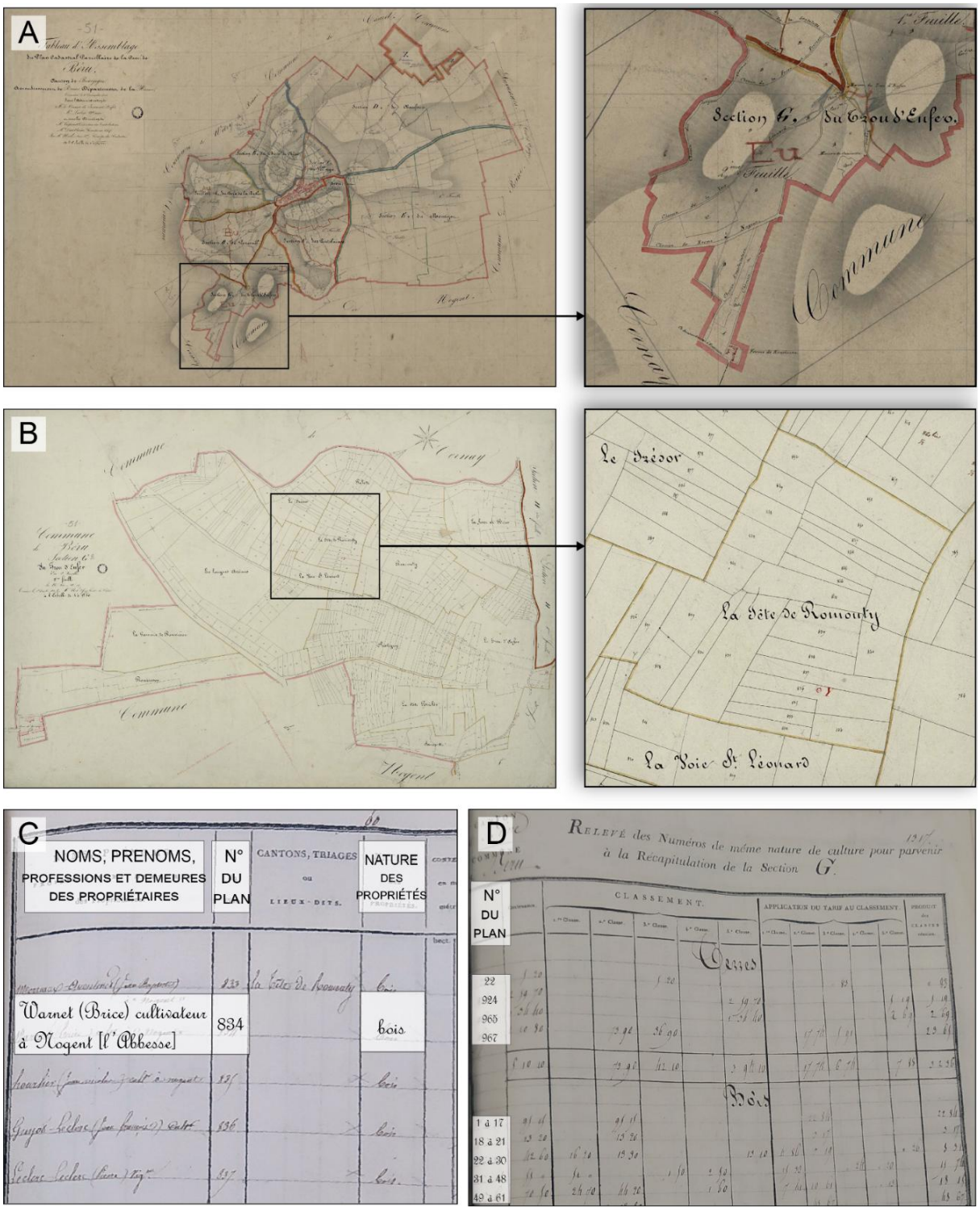


Figure 4.9 : Documents composant le cadastre napoléonien de chaque commune. A : Tableau d'assemblage ; B : Plan de section ; C : États de section ; D : Récapitulatif de section.

Son intérêt pour la thèse réside dans la résolution spatiale des informations relatives à l'usage du sol, à la morphologie du parcellaire, aux sites d'extraction de géomatériaux, voire dans une perspective microhistorique, au nom des propriétaires. Il fournit notamment une représentation du paysage 40 ans avant l'implantation des forts Séré de Rivières à l'échelle de la parcelle. Sa pertinence s'exprime particulièrement s'agissant des catégories d'usage du sol qui couvrent de petites surfaces, car elles sont généralement sous-estimées dans la carte d'État-Major produite en parallèle (*cf. infra ;* Rochel et al., 2017a). Il convient cependant de prendre en considération que les états de section renseignent sur l'usage dominant au sein de chaque parcelle et non à propos d'un usage du sol effectif sur toute leur emprise (Rochel et al., 2017a). Un bosquet au milieu d'un champ céréalicole ou une clairière à vocation pastorale ne seraient ainsi pas représentés.

Les dates de levée des cadastres napoléoniens du secteur de Reims vont du début des années 1810 dans le Massif de Saint-Thierry à 1850 pour la commune de Beaumont-sur-Vesle (fig. 4.10). La date moyenne (1831) coïncide presque avec la moyenne nationale établie à 1832 d'après l'Annuaire de l'administration des contributions directes et du cadastre de 1902 (Rochel et al., 2017a). Les quatre valeurs modales correspondent dans l'ordre chronologique à la commune de Reims et aux localités adjacentes (1819, 1823, 1824, 1825), aux villages méridionaux et sud-est de l'agglomération (début de la décennie 1830-1840), à la moitié nord-est de la périphérie de Reims (principalement 1835) et au quart sud-oriental du secteur d'étude (fin de la décennie 1830-1840 ; fig. 4.11).

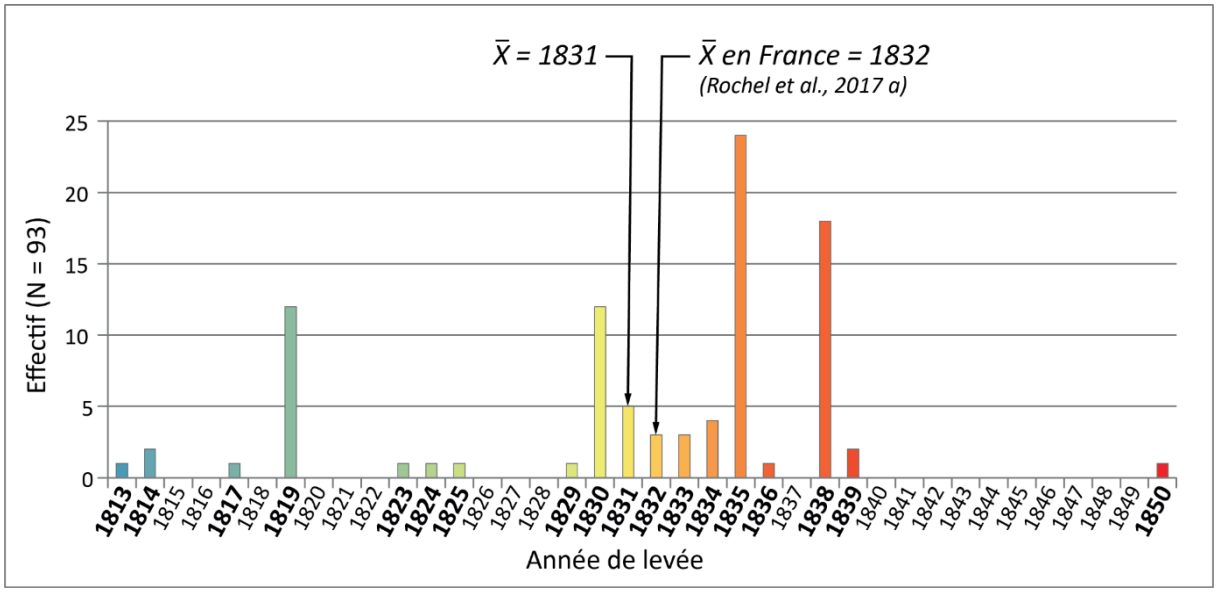


Figure 4.10 : Effectif de communes en fonction de l'année de levée du cadastre napoléonien dans la région de Reims.

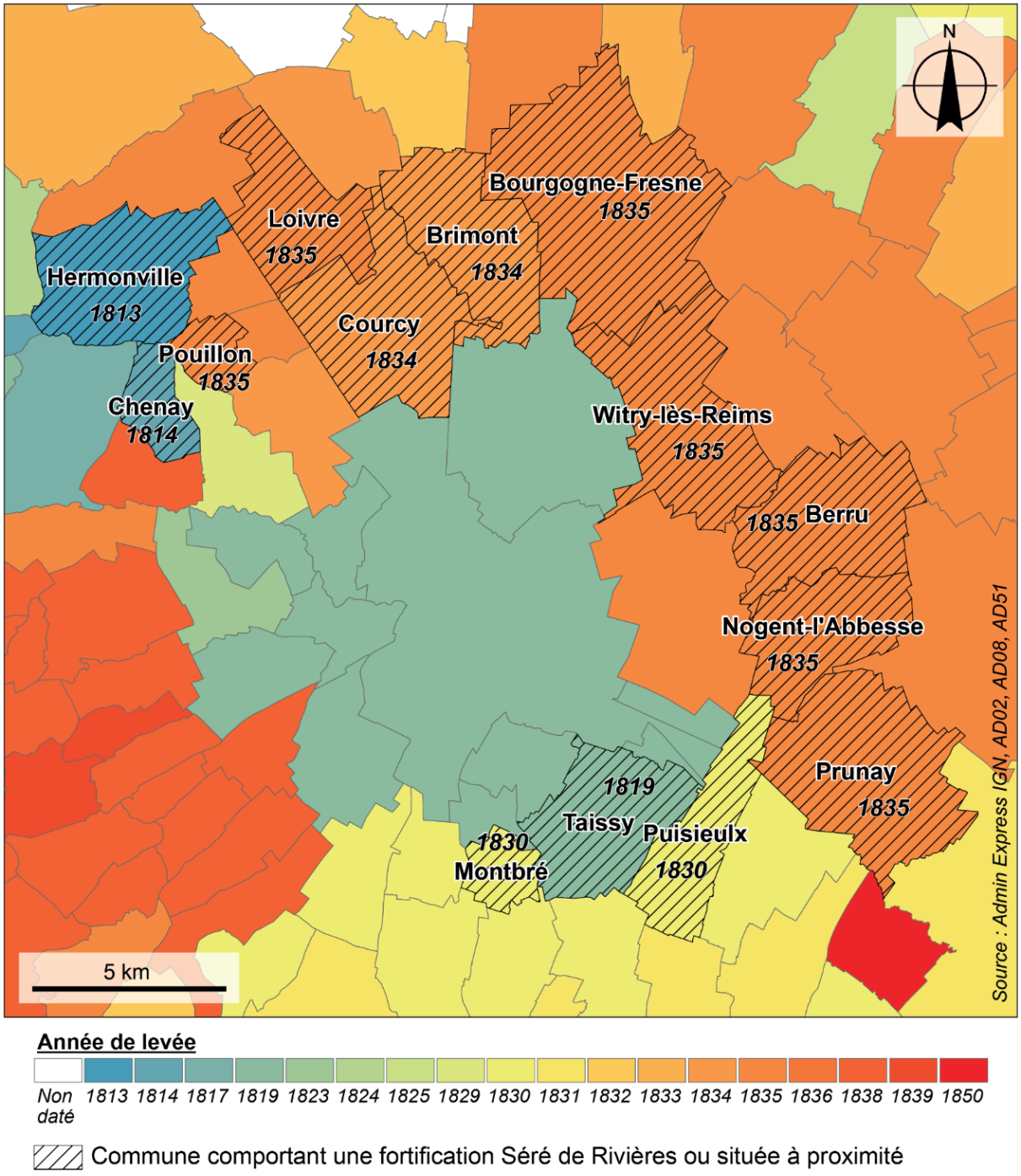


Figure 4.11 : Dates de levé du cadastre napoléonien des communes de la région de Reims. Les emprises communales sont celles des communes actuelles (BD ADMIN EXPRESS) dont certaines ont été grandement bouleversées depuis la Première Guerre mondiale. La modification la plus notable concerne la fusion des communes de Bourgogne et Fresne-lès-Reims en 2016.

4.2.2.4. Carte d'État-Major

La carte d'État-Major (fig. 4.12A) renouvelle au XIXe siècle l'entreprise cartographique des Cassini en s'appuyant sur l'expérience militaire acquise lors des campagnes napoléoniennes (Taborelli, 2018). Entre 1817 et 1866, 273 feuilles couvrant l'ensemble du territoire français sont levées et publiées sous l'impulsion de Louis XVIII (Seconde Restauration) à l'échelle 1/80 000 pour l'impression, à partir de minutes établies au 1/40 000, avec une année moyenne de levée pondérée à la surface levée annuelle établie à 1843 (fig. 4.13A ; Rochel et al., 2017a).

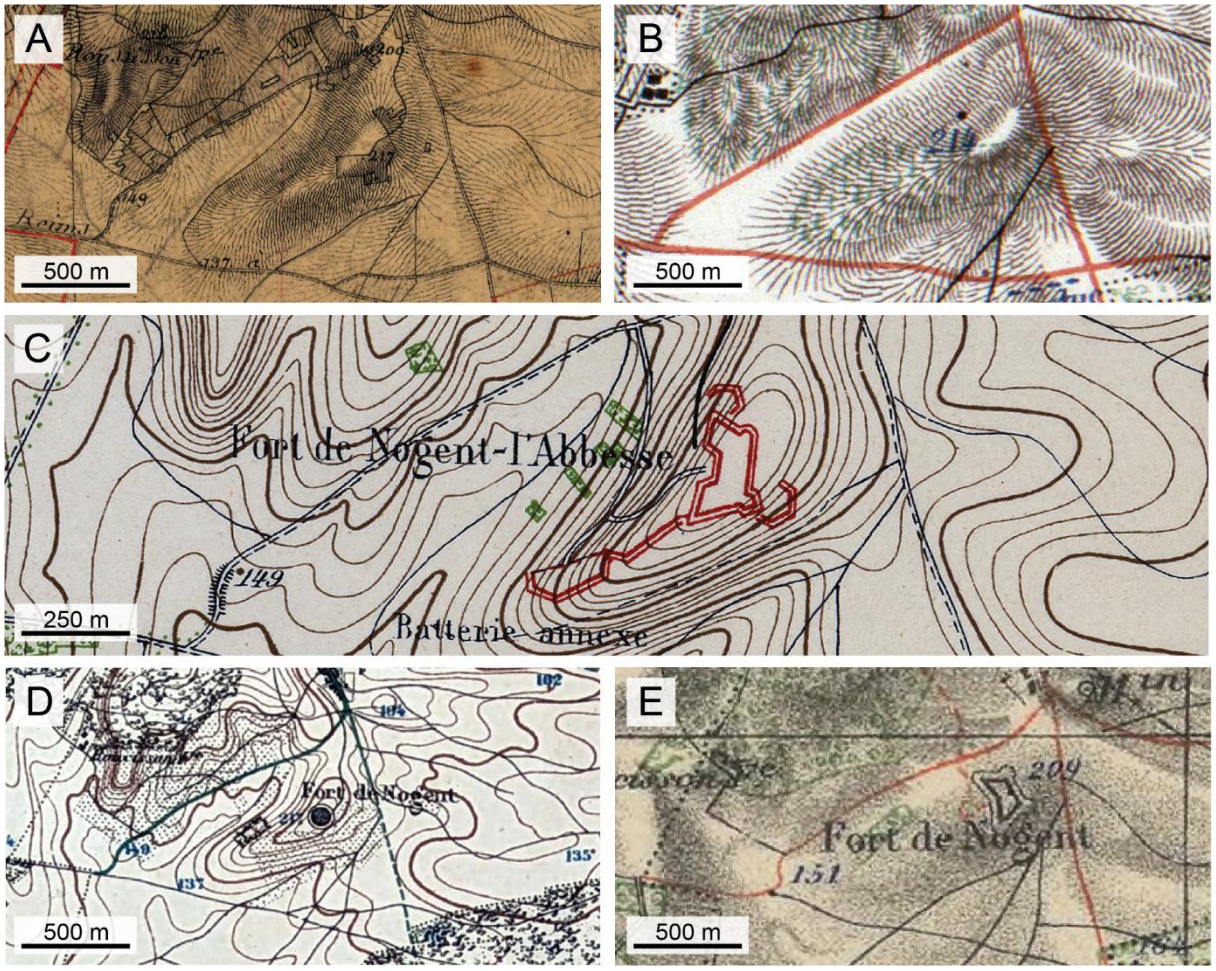


Figure 4.12 : Documents cartographiques datant du XIXe siècle utilisés dans l'étude du paysage de guerre rémois et des fortifications Séré de Rivières. A : Carte d'État-Major (1/40 000) ; B : Atlas de Poinsignon (1/80 000) ; C : Plan du Génie des environs de Reims (1/20 000) ; D : Atlas départemental des Ponts et chaussées et services vicinaux (1/50 000) ; E : Carte de France du Service vicinal (1/100 000).

Cette double échelle explique en partie la qualité planimétrique accrue et le détail des informations topographiques et paysagères, alors qu'aucune véritable révolution technique n'a eu lieu depuis la fin du XVIIIe siècle (Bursaux, 2019). Pour 94 % du territoire français, les levés reprennent les données du cadastre napoléonien (Bacchus et Dupuis, 1990). Rochel et al. (2017a) soulignent toutefois que leur apport n'est pas identique car les informations relatives aux usages du sol diffèrent quelque peu (*e.g.*, cadastre

napoléonien : échelle parcellaire, catégories plus nombreuses, dates différentes, *etc.*). Ils démontrent par ailleurs que les cartes d'État-Major constituent des sources cartographiques fiables pour la localisation, la délimitation et l'estimation des catégories d'usage les plus répandues (forêts, vignes, cultures), qui sont presque similaires au cadastre napoléonien et aux statistiques associées.

La facilité d'emploi et la qualité des minutes au 1/40 000, numérisées et géoréférencées sur Remonter le temps, en font un document d'étude géohistorique incontournable pour étudier le paysage et l'occupation du sol au XIXe siècle (Dupouey et al., 2007). L'interprétation de la légende s'est particulièrement appuyée sur le manuel de digitalisation proposé par Favre et al. (2017).

Le secteur de la ceinture fortifiée de Reims, entièrement digitalisé dans le cadre de la thèse, se situe à l'interface de quatre feuilles de la carte de Reims géoréférencées pour l'occasion (couche source : SCAN 25® ; méthode de transformation : polynomiale 1er degré ; fig. 4.13B). Leur lever, réalisé en 1825-1826 et 1831, intervient à la veille de changements sociétaux d'ampleur (révolution industrielle, apparition du chemin de fer, urbanisation exacerbée, *etc.* ; Bursaux, 2019), lors du minimum surfacique présumé des forêts françaises (1830-1850 ; Rousseau, 1990 ; Dupouey et al., 2007). L'interprétation des données d'occupation du sol doit toutefois être prudente compte tenu de la représentation des lignes de chemin de fer et des canaux apparus entre 20 et 40 ans plus tard, incitant à la considérer comme traduisant supposément le paysage des années 1830 (fig. 4.14).

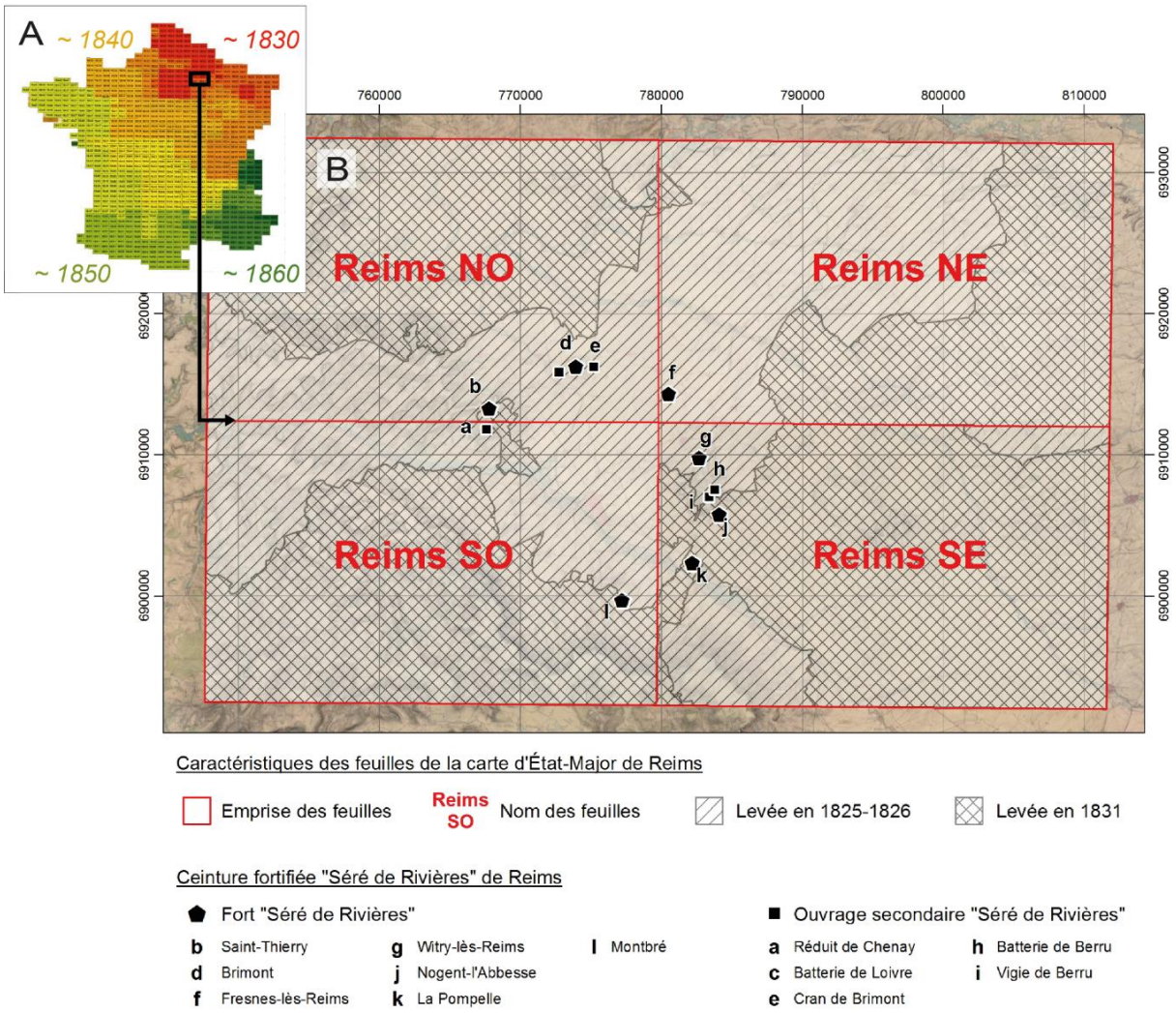


Figure 4.13 : Emprise et date de levé des feuilles de la carte d'État-Major (minutes au 1/40 000). A : Tableau d'assemblage selon le millésime (année de la première édition ; Touzet et Lallemant, 2016) ; B : Feuilles de la carte d'État-Major de Reims.



Figure 4.14 : Extrait de la feuille Reims NO de la carte d'État-Major sur laquelle apparaissent le canal de l'Aisne à la Marne (1866) et la ligne de chemin de fer Reims-Laon (1857), alors que la carte est théoriquement réalisée en 1825-1826 et 1831 (fig. 4.13B).

4.2.2.5. Cartes et plans de la décennie de construction des forts (1874-1884)

L'Atlas de Poinsignon (fig. 4.12B) est réalisé pendant un peu moins d'une décennie (1869-1878) sous la supervision de l'historien et géographe Auguste-Maurice Poinsignon (1814-1899). Cet « *Atlas de géographie physique, administrative, historique et archéologique des 32 cantons de la Marne* » possède la particularité d'avoir été réalisé en collaboration avec le corps enseignant du département (Poinsignon, 1877) : « *S'il a été possible d'entrer dans ces détails et de déterminer ainsi la place de nos richesses archéologiques ou géologiques, c'est que chaque instituteur a été tout d'abord appelé à dresser la carte de sa commune. De ces cartes particulières réunies, celui d'entre eux qu'ils en avaient jugé le plus capable dans chaque circonscription cantonale, a formé la carte du canton, et le second travail terminé a été ensuite revu par l'Inspecteur de l'Académie* ».

Comme indiqué dans cet extrait, cet atlas présente, en plus des informations habituelles des cartes topographiques (occupation du sol, topographie, réseau hydrographique, *etc.*), les vestiges archéologiques connus ainsi qu'un inventaire des sites d'extraction en activité.

L'élaboration de ce recueil de cartes est concomitante avec la publication de l'Atlas Départemental de la Marne au 1/50 000 (fig. 4.12D), « *dressé, suivant décision du Conseil général, en date du 16 avril 1874, par le service des Ponts et Chaussées et des Chemins vicinaux* » (Bert, 1878). Ce document, contenant 30 cartes cantonales et une carte générale de la Marne, s'intègre dans l'élan national de publication d'atlas découpés par cantons préparés par ces services dès la fin des années 1860 (Arnaud, 2022a).

La Carte de l'arrondissement de Reims (1884 ; fig. 4.12E ; disponible sur la plateforme Gallica) est un extrait de la carte de France au 1/100 000 dressée par le service vicinal sous la supervision d'Edouard Anthoine, Ingénieur-chef au ministère de l'Intérieur. Elle est publiée à partir de 1879 dans le but de créer un outil répondant aux besoins des administrations civiles qui ne sont plus satisfaites par la carte d'État-Major, mettant ainsi fin à l'hégémonie séculaire du Dépôt de la guerre sur la production cartographique (Arnaud, 2022a). Le service vicinal en question, fondé en 1836, encadre l'aménagement d'un réseau routier carrossable au cours du XIXe et compte environ 5 000 agents à l'époque de publication de la carte. Le réseau vicinal, qui passe de 122 000 à 275 000 km de 1866 à 1900 (Demangeon, 1946), reconfigure alors les mobilités et augmente le contrôle social de l'État en instaurant un quadrillage du territoire national (Mouret, 2021). Au lendemain de la guerre franco-prussienne (1870-1871), cela s'exprime vis-à-vis des modalités de contrôle militaire des aménagements au sein de la zone frontière (fig. 2.9 ; *cf.* partie 2.2.2), devant assurer à l'armée la connaissance des caractéristiques topologiques du territoire, et notamment des espaces forestiers (ouvertures, connexions, points nodaux, *etc.*). L'application des directives de la commission mixte des travaux publics (CMTP) et du Comité des fortifications

(*e.g.*, contrôle effectif sur les chemins de plus de 6 m de large) nécessite alors la cartographie précise et à jour des différents types de voies (Amat, 2024).

Enfin, un Plan des Environs de Reims (fig. 4.12C) est levé en 1877 et édité en 1879 au 1/20 000 par le Génie (SHD, GR 1 V H 2141). Il s'inscrit dans une démarche de cartographie des environs des principales places fortes, menée entre 1878 et 1882. Son apport est très élevé pour la thèse, car il représente des composantes de l'occupation liées (ou susceptibles de l'être) à la construction de la première tranche de fortifications alors en cours d'exécution (*e.g.*, voie étroite, campement).

Cette densité de documents cartographiques produits pendant la décennie 1874-1885 est symptomatique du grand élan d'innovations technico-militaires intervenues en réaction à la guerre de 1870-1871 (*cf.* partie 2.2.3). Cette période est notamment marquée par un essor de la production et de la diffusion cartographiques ainsi que par la généralisation de la couleur (Arnaud, 2022e). L'intérêt d'une échelle de temps aussi restreinte réside dans la possibilité d'apprécier des changements paysagers et d'occupation du sol à une résolution temporelle pluriannuelle avant, pendant et après la création de la ceinture fortifiée de Reims. Il est ainsi théoriquement possible de faire ressortir les modifications induites par la militarisation du territoire, en particulier sur le plan paysager. Elles enrichissent par ailleurs l'étude des stratégies mises en œuvre de la construction des ouvrages fortifiés, tant dans l'organisation spatiale des chantiers que vis-à-vis de l'approvisionnement en géomatériaux (*cf.* partie 6.1.1.1).

4.2.2.6. Plans directeurs des GCTA

Les Plans directeurs des GCTA (fig. 4.15A) désignent les cartes et plans militaires produits pendant la Première Guerre mondiale par l'armée française. Leur rôle est de documenter les conditions géographiques des zones d'engagement et les théâtres des opérations à des fins tactiques, notamment dans le cadre de la guerre de position (Combaud et al., 2016 ; Taborelli, 2018 ; Arnaud, 2022c).

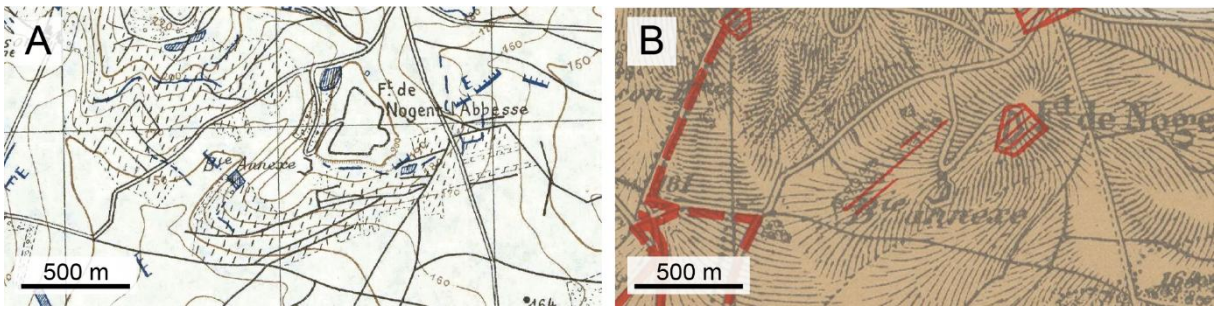


Figure 4.15 : Documents cartographiques et planimétriques relatifs à la Première Guerre mondiale utilisés dans l'étude du paysage de guerre rémois et des fortifications Séré de Rivières. A : Plan directeur des GCTA (1/20 000, 1/10 000, 1/5 000) ; B : Carte spéciale des régions dévastées (1/50 000).

Lorsque le conflit débute pendant l'été 1914, l'armée française est mal préparée (Goya, 2019) : aucun corps doctrinal n'est établi et aucune tactique générale n'est préconisée par le haut commandement, les règlements rédigés à l'aube du conflit (sur le service en campagne en octobre 1913 et sur la manœuvre de l'infanterie en avril 1914) ne sont pas pris en compte lors des opérations fin 1914, les premières préconisations de combat de position (organisation des réseaux défensifs, roulement des troupes) ne sont émises qu'en septembre 1914 par le GQG. La réorganisation urgente de l'armée durant les premiers mois du conflit aboutit donc à la création du « groupe de canevas de tir » sur proposition du directeur du SGA (Général Bourgeois).

Plus de 55 millions de documents cartographiques sont produits par le SGA durant le conflit entre 1914 et 1918, dont environ 13 500 000 de plans directeurs multiscalaires (Taborelli, 2018). Chaque échelle correspond à une utilisation différente et à une précision croissante (fig. 4.16A-C, 4.17). Les opérations de l'artillerie nécessitent des plans au 1/20 000 couvrant l'entièreté du front de l'ouest (fig. 4.16A). Celles de l'infanterie emploient des plans au 1/10 000 comprenant une zone plus restreinte du front (fig. 4.16B). Des plans au 1/5 000 sont enfin tirés pour des opérations ponctuelles sur de petites surfaces (fig. 4.16C).

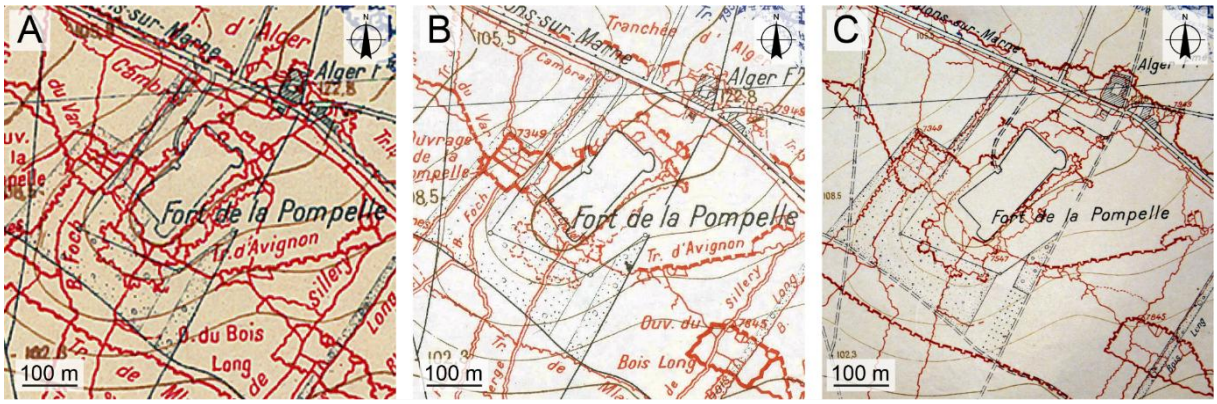


Figure 4.16 : Comparaison des informations relatives au secteur du fort de la Pompelle sur les plans directeurs au 1/20 000 (A), 1/ 10 000 (B) et 1/5 000 (C). La précision croît à mesure que l'échelle diminue. A : Plan directeur de Reims au 1/20 000 du 15 juillet 1918 ; B : Plan directeur de Reims SE au 1/10 000 du 22 mars 1918 ; C : Plan directeur de la Pompelle au 1/5 000 du 17 février 1918.

Ces documents bénéficient de plusieurs innovations techniques issues des besoins de la guerre (Combaud et al., 2016 ; Taborelli, 2018) :

- standardisation de la projection cartographique en Lambert zone Nord de Guerre (projection conforme) et du carroyage (quadrillage kilométrique) ;
- standardisation de la symbologie ;
- fonds de cartes modernisés (noir ou noir-bistre) ;
- emploi de la photographie aérienne (Dumarche, 1988) ;
- nivellement et levés géodésiques renouvelés.

Les documents exploités dans le cadre de la thèse proviennent du SHD pour les plans français (fig. 4.16A-C, 4.17), des services d'archives associés à des collectivités territoriales (archives départementales, bibliothèques, musées) et de collections privées (*cf.* partie 4.1). Concernant la documentation étrangère, seuls des plans allemands (*Stellungskarten*) ont été récupérés auprès des Archives fédérales numériques (*Bundesarchiv-Abteilung Militärarchiv* de Fribourg-en-Brisgau, les *Bayerisches Hauptstaatsarchiv* de Munich, *Hauptstaatsarchiv* de Dresde). L'accès à ces plans allemands a notamment bénéficié de la collaboration de Jean-Michel Durlet, président du comité historique de l'AAFNA. Les « *Trench-Map* » n'ont pas été utilisées bien que les troupes du *Commonwealth* aient combattu dans la région.

Ces documents constituent une précieuse source d'information dans la compréhension du polémopaysage mis en évidence par les données LiDAR, car ils permettent de caractériser les traces géomorphologiques de la Première Guerre mondiale (Taborelli et al., 2017a). En plus d'apporter des informations planimétriques relatives à l'occupation du sol, au réseau viaire et à l'hydrographie (en noir), ainsi qu'à la topographie (courbes de niveau couleur bistre), ces cartes décrivent les réseaux de défenses (abris, tranchées, chemins de fer, emplacements d'artillerie, barbelés, *etc.*) alliés et français (en rouge) et allemands (en bleu ; annexe 37). Il est alors possible de concevoir comment les fortifications Séré de Rivières s'insèrent au sein des systèmes spatiaux militaires de chaque belligérant (Devos et al., 2019b ; Ancelin et al., 2023). L'exhaustivité de ces documents n'est toutefois pas assurée car des informations sont volontairement omises sur les dispositifs défensifs alliés en cas de récupération par l'ennemi (Taborelli, 2018). De plus, la récolte de renseignements peut s'avérer particulièrement ardue pour les secteurs sous forêt en fonction de la structure et de la densité de la canopée (Amat, 2024).

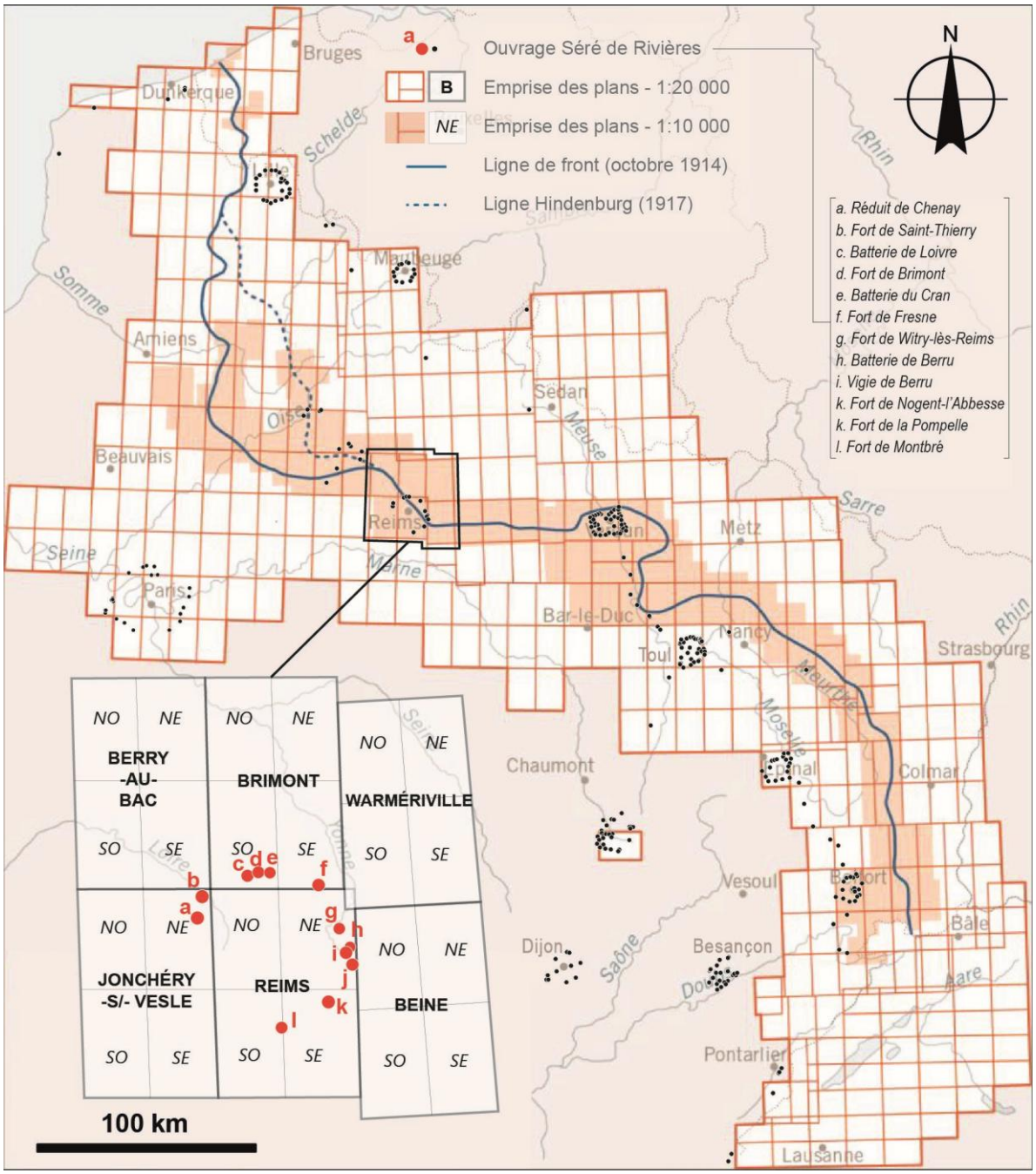


Figure 4.17 : Tableaux d'assemblage des plans directeurs de tir produits au 1/20 000 et 1/10 000 pendant la Première Guerre mondiale (d'après Arnaud, 2022c).

4.2.2.7. Carte spéciale des régions dévastées

Les Cartes spéciales des régions dévastées, publiées par le SGA à partir de 1920, constituent une production cartographique directement issue des impératifs de la reconstruction dans les territoires affectés par la Première Guerre mondiale (fig. 4.15B). Établies à l'échelle du 1/50 000 par agrandissement de la carte d'État-Major, elles conservent le fond topographique hérité du XIXe siècle tout en intégrant, par surcharges chromatiques, les transformations liées au conflit et à l'après-guerre (destructions en rouge, premiers travaux de reconstruction en bleu). Deux éditions successives sont diffusées la même année, la

seconde proposant un enrichissement des informations relatives aux équipements et à la reprise de l'occupation humaine, au prix d'une emprise géographique plus restreinte (Arnaud, 2022b). Elles offrent ainsi un instantané cartographique du paysage à la sortie de la guerre, permettant d'appréhender simultanément l'ampleur des destructions et les premières dynamiques de reconstruction.

4.2.3. Photographies aériennes

Les photographies aériennes se sont imposées comme une source d'étude incontournable du paysage, ayant généré au cours du XXe siècle une « *révolution de vision* » permettant une observation distanciée de l'espace (Deffontaines et Delamarre, 1955).

Dès les années 1920, De Martonne (1924) constate déjà que « *la vision aérienne [permettant] à la fois la perception des détails et celle des ensembles, l'analyse et la synthèse* », est d'un intérêt considérable pour l'étude géographique. Considérée comme le « *macroscope du géographe* » (Humbert, 2012), la discipline géographique n'en a pas pour autant eu le monopole, la destination de ces clichés ayant été en parallèle archéologique (*e.g.*, les prospections aériennes pionnières du Père Poidebard au Moyen-Orient ; Nordiguian et Voisin, 2020) et surtout militaire. Cette trilogie d'utilisation en fait ainsi un « matériau » tout trouvé pour ce travail de recherche portant sur les fortifications Séré de Rivières, objet d'étude de parenté militaire, à la fois géographique et archéologique.

Les photographies aériennes utilisées correspondent donc, en ce sens, à des clichés militaires pris peu avant et pendant la Première Guerre mondiale, issus du dépouillement d'archives historiques. Elles sont également issues de BD publiques couvrant toute la période d'après-guerre jusqu'à aujourd'hui.

Le corpus de photographies utilisées symbolise la dichotomie, entre photographies aériennes verticales et obliques, rappelée par Humbert et Renard-Grandmontagne (2020). Les orthophotographies, photographies aériennes verticales numériques aux déformations spatiales corrigées, constituent désormais des données scientifiques privilégiées dans l'étude du paysage. Elles sont particulièrement faciles à intégrer aux SIG, logiciels devenus incontournables dans les cursus universitaires de géographie (Boquet, 2018). Les photographies aériennes obliques fournissent en parallèle une vision pragmatique du paysage car elles n'aplatissent pas le relief.

4.2.3.1. Photographies aériennes de la Première Guerre mondiale

Après de premiers clichés aériens datant de la décennie 1850-1860 (ballons captifs et montgolfière), le développement de la photographie aérienne va de pair avec celui de l'aéronautique, à l'aune de la Première Guerre mondiale (Taborelli, 2018 ; Humbert et

Renard-Grandmontagne, 2020). Pendant et après le conflit, l'exposition médiatique des vainqueurs de combats aériens est telle, en France et en Allemagne, que les pilotes (« les As ») deviennent des symboles de l'aéronautique militaire (Accoulon, 2024). L'armée française s'équipe de son premier aéronef dans les années 1909-1910 en vue d'effectuer des missions de reconnaissance militaire initialement peu offensives (Dumarche, 1988). Le Service du matériel aéronautique militaire est finalement créé le 19 avril 1914 à Chalais-Meudon (Taborelli, 2018).

La doctrine d'emploi, précisée par une note militaire du directeur du service aéronautique du GQG (le Commandant Barès) dès novembre 1914, alors que le front se stabilise à l'issue de la course à la mer, exprime ainsi déjà l'éventail de missions que l'aviation sera amenée à assurer durant le conflit (Lespinois, 2013) : reconnaissance d'objectifs terrestres, reconnaissance pour le réglage d'artillerie, couverture photographique du terrain, bombardement et combat aérien. Le même mois, la mise en place d'une collaboration entre les services aéronautiques militaires et le GCTA est par ailleurs exigée dans une note rédigée par le général en chef (Taborelli, 2018). Chaque cliché pris par les sections de photographes est décortiqué dans les moindres détails afin d'en relever toutes les informations, ensuite expliquées et traduites graphiquement directement sur l'image par l'intermédiaire de croquis, dans le cadre de l'élaboration des plans directeurs des GCTA (fig. 4.18A-B ; Chablat-Beylot, 2010 ; Taborelli, 2018 ; *cf.* partie 4.2.2.6).

Encore limitée dans les années 2000 (Bewley, 2005), la conscience de l'intérêt scientifique des photographies aériennes de la Première Guerre mondiale dans l'étude du paysage s'est grandement développée, en particulier sous l'impulsion du Département d'Archéologie de l'Université de Ghent (Stichelbaut, 2009 ; Stichelbaut et al., 2009, 2013, 2016 ; Cowley et Stichelbaut, 2012 ; Gheyle et al., 2016a, 2016b ; Note et al., 2018). Il est aujourd'hui admis que les nombreuses missions de reconnaissance aérienne effectuées durant le conflit gratifient d'une source documentaire unique l'étude du paysage du début du XXe siècle au sein d'un panel disciplinaire varié (*e.g.*, archéologie et géohistoire du paysage, gestion du patrimoine culturel ; Stichelbaut, 2009). Leurs applications, dépassant le cadre de l'étude des paysages militarisés, touchent à la détection des sites archéologiques par indice phytographique (Stichelbaut et al. 2013) dans le cadre de l'archéologie aérienne (Chevallier, 1964 ; Gautier et al., 2019). Elles concernent autrement l'inventaire, la description, l'interprétation et l'analyse spatiale du paysage militarisé associé à la Première Guerre mondiale (Stichelbaut, 2009).

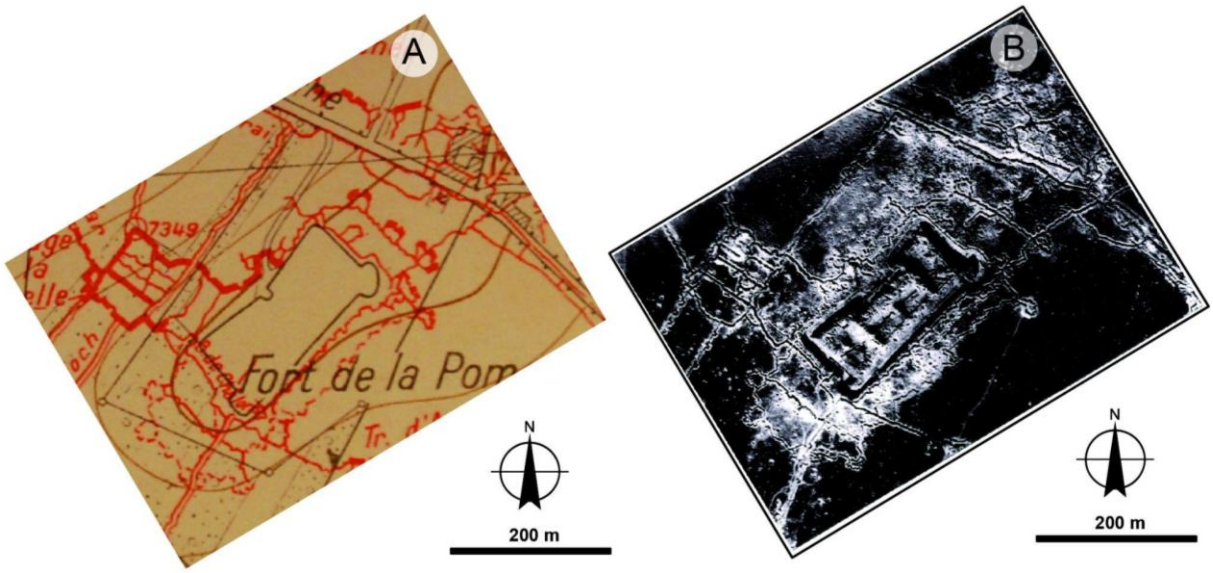


Figure 4.18 : Comparaison d'un plan directeur et d'une photographie aérienne. A : Plan directeur des GCTA de Reims du 15 juillet 1918 (AD51, 31 Fi 60). B : Photographie aérienne du secteur du fort de la Pompelle de février 1918 (collection Musée de la Pompelle, ville de Reims).

Le secteur de la Champagne et de Reims, s'inscrivant au milieu du front de l'ouest, est majoritairement couvert pendant le conflit par les services photographiques français et allemands (Stichelbaut, 2009). En France, le SHA centralise, parmi tous les documents techniques associés aux activités militaires françaises, plus de 200 000 clichés de ce front occidental, qui sont finalement dispersés à travers les différentes régions militaires en 1923 (Beylot, 2009). La collection, aujourd'hui relativement fragmentée, se situe principalement au SHD (*cf.* partie 4.1.1). En outre, bien que l'article 202 du Traité de Versailles de 1919 oblige le reversement de tout le matériel aéronautique aux armées alliées, de nombreux documents restent en Allemagne après le conflit. Ces derniers se répartissent aujourd'hui au sein des différents services d'archives d'État des *Lander*, ainsi qu'au sein des archives fédérales (*Bundesarchiv*)[18]. La principale collection concerne en particulier les archives principales de l'État de Bavière (*Bayerisches Hauptstaatsarchiv*), regroupant environ 300 000 clichés du front de l'ouest classés par division d'armée. Aucune recherche n'y a néanmoins été entreprise, les rares documents allemands utilisés provenant de fonds d'archives publics et privés locaux.

Pour ce travail, 21 photographies aériennes verticales de la Première Guerre mondiale ont été géoréférencées lorsqu'elles couvraient partiellement ou totalement un fort de Reims (fig. 4.18A-B, 4.19, 4.20). Du fait de l'origine majoritairement française des clichés, les forts concernés sont tous englobés dans les réseaux de défense allemands pendant le conflit, ou font l'objet d'âpres combats (*e.g.*, fort de la Pompelle ; fig. 4.18A-B). Les archives aéronautiques du SHD constituent la source principale avec neuf clichés pris lors de deux

[18] Un état des lieux est notamment proposé par Haupt (2009).

campagnes effectuées au printemps 1915 au nord-ouest de Reims par une escadrille de la 5e armée, puis à l'automne 1915 sur les buttes de Berru et Brimont par l'escadrille C39 (tab. 4.7). Les douze autres clichés proviennent autrement des Archives départementales de la Marne, de la *Generallandesarchiv* de Karlsruhe, ainsi que de fonds privés particuliers et associatifs (tab. 4.8).



Figure 4.19 : Cliché orienté nord de la partie méridionale du Mont de Berru, à l'ouest de Nogent-l'Abbesse, pris le 29/04/1915 (SHD, AI 1 A 354). L'ouvrage de la vigie de Berru, placé au sommet de la butte, apparaît en haut à droite de l'image.

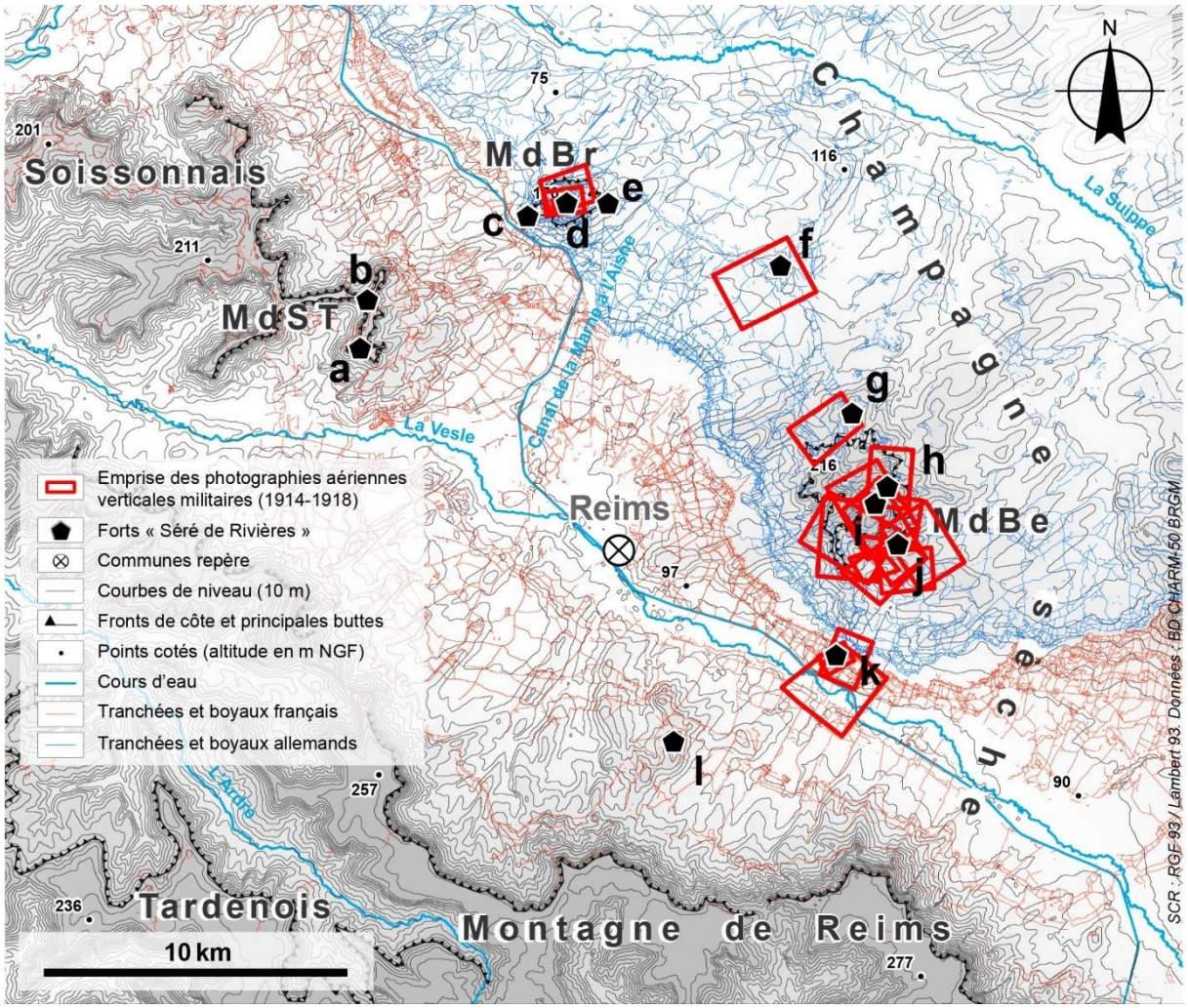


Figure 4.20 : Emprises des photographies aériennes verticales de la Première Guerre mondiale géoréférencées. a : Réduit de Chenay ; b : Fort de Saint-Thierry ; c : Batterie de Loivre ; d : Fort de Brimont ; e : Batterie du Cran de Brimont ; f : Fort de Fresne ; g : Fort de Witry-lès-Reims ; h : Batterie de Berru ; i : Vigie de Berru ; j : Fort de Nogent-L'Abbesse ; k : Fort de la Pompelle ; l : Fort de Montbré ; MdBe : Mont de Berru ; MdBr : Mont de Brimont ; MdST : Massif de Saint-Thierry.

Carton	Dossier	Unité / Série	N°	Date	Région	Département	Arrondissement	Canton	Commune	Code INSEE	Lieu-Dit
Al 1 A 354	3	Ve Armée	7	29/04/1915	Grand Est	Marne	Reims	Beine	Nogent-l'Abbesse	51403	Nogent-l'Abbesse
Al 1 A 354	3	Ve Armée	8	29/04/1915	Grand Est	Marne	Reims	Beine	Nogent-l'Abbesse	51403	Ouest de Nogent-l'Abbesse
Al 1 A 354	3	Ve Armée	10	29/04/1915	Grand Est	Marne	Reims	Beine	Nogent-l'Abbesse	51403	Ouest de Nogent-l'Abbesse
Al 1 A 354	3	Ve Armée	19	12/05/1915	Grand Est	Marne	Reims	Bourgogne	Bourgogne-Fresne	51075	Fort de Fresnes
Al 1 A 354	3	Ve Armée	21	12/05/1915	Grand Est	Marne	Reims	Bourgogne	Bourgogne-Fresne	51075	Fort de Fresnes
Al 1 A 354	3	Escadrille C39	47	12/10/1915	Grand Est	Marne	Reims	Bourgogne	Witry-lès-Reims	51662	Fort de Witry-lès-Reims
Al 1 A 354	3	Escadrille C39	49	12/10/1915	Grand Est	Marne	Reims	Beine	Berru	51052	Fort et Bourg de Nogent-l'Abbesse
Al 1 A 354	3	Escadrille C39	79	10/10/1915	Grand Est	Marne	Reims	Bourgogne	Brimont	51088	Fort de Brimont
Al 1 A 354	3	Escadrille C39	83	10/10/1915	Grand Est	Marne	Reims	Bourgogne	Brimont	51088	Fort de Brimont

Tableau 4.7 : Liste des photographies de la Première Guerre mondiale du SHD géoréférencées dans le cadre de la thèse.

Source	Cote	Unité / Série	Date	Région	Départe ment	Arrondisse ment	Canton	Commune	Code INSEE	Lieu-Dit
MFP	/	/	15/02/1918	Grand Est	Marne	Reims	Verzy	Puisieulx	51450	Fort de la Pompelle
MFP	/	Escadrille C39	21/02/1916	Grand Est	Marne	Reims	Verzy	Puisieulx	51450	Fort de la Pompelle
GAK	456 F 86 n174	Feldartillerie-Regiment 14	09/1915	Grand Est	Marne	Reims	Beine	Nogent-l'Abbesse	51403	Batterie du fort de Nogent-l'Abbesse
GAK	456 F 86 n174	Feldartillerie-Regiment 14	09/1915	Grand Est	Marne	Reims	Beine	Nogent-l'Abbesse	51403	Fort de Nogent-l'Abbesse
GAK	456 F 86 n174	Feldartillerie-Regiment 14	09/1915	Grand Est	Marne	Reims	Beine	Nogent-l'Abbesse	51403	Fort de Nogent-l'Abbesse
AD51	75 Fi 223	/	1918	Grand Est	Marne	Reims	Beine	Nogent-l'Abbesse	51403	Sud Nogent-l'Abbesse
AD51	75 Fi 43	/	1918	Grand Est	Marne	Reims	Beine	Nogent-l'Abbesse	51403	Fort de Nogent-l'Abbesse
AD51	75 Fi 47	4e CA	16/06/1918	Grand Est	Marne	Reims	Beine	Nogent-l'Abbesse	51403	Vigie de Berru
AD51	75 Fi 62	4e CA	01/06/1918	Grand Est	Marne	Reims	Beine	Berru	51052	Batterie de Berru
AAFNA	/	/	25/05/1917	Grand Est	Marne	Reims	Bourgogne	Brimont	51088	Fort de Brimont
AAFNA	/	/	/	Grand Est	Marne	Reims	Bourgogne	Brimont	51088	Fort de Brimont
AAFNA	/	/	/	Grand Est	Marne	Reims	Bourgogne	Loivre	51329	Batterie de Loivre

Tableau 4.8 : Liste des photographies de la Première Guerre mondiale géoréférencées provenant d'autres sources que le SHD. AD51 : Archives Départementales de la Marne ; AAFNA : Association des Amis du Fort de Nogent-l'Abbesse ; GAK : Generallandesarchiv Karlsruhe ; MFP : Musée du Fort de la Pompelle.

Aucune analyse comparative ou stéréoscopique n'a été réalisée comme cela a pu être effectué sur les secteurs du front pour lesquels ont persisté une grande densité de clichés facilement accessibles et centralisés (Stichelbaut, 2009). De la même manière, l'exploitation des plans directeurs des GCTA a été préférée s'agissant de l'analyse spatiale des réseaux de défense (*cf.* partie 4.2.2.6 ; Taborelli et al., 2016, 2017a). Malgré tout, bien que la couverture ne soit pas exhaustive, leur apport dans ce travail de recherche réside bien en ce qu'ils constituent un enregistrement incontestable du paysage environ 40 ans après la construction de la ceinture fortifiée. Les photographies aériennes de la guerre ont ainsi constitué une source complémentaire dans l'interprétation du paysage, avant et pendant le conflit, réalisée dans le cadre de l'approche archéogéomorphologique et géohistorique. À cette fin également, l'analyse de plusieurs photographies aériennes obliques a été menée en complément, dont trois clichés pris depuis un dirigeable en 1913, à l'occasion d'un exercice de mine réalisé au fort de Brimont.

4.2.4. Photographies aériennes postérieures (Remonter le temps, BD LOTERR)

Les clichés postérieurs à la Première Guerre mondiale proviennent presque exclusivement du site Remonter le temps de l'IGN, où sont inventoriés des photographies aériennes verticales couvrant la période 1949-2013 (annexe 38). Tous les forts bénéficient de la sorte d'un panel de clichés permettant de saisir l'évolution du paysage avec un pas de temps de l'ordre de cinq ans. Cet état des lieux photographique récurrent permet de documenter la trajectoire des ouvrages, notamment d'un point de vue biogéographique (*cf.* partie 4.4.2). Deux prises de vue aériennes obliques des forts de Brimont et de Nogent-l'Abbesse captées en 1935 font exception. La banque d'images aériennes obliques du LOTERR, regroupant des clichés remontant jusqu'aux années 1980, fournit dans une très moindre mesure un échantillon de quelques fortifications Séré de Rivières, qui ne concerne toutefois pas la ceinture fortifiée de Reims (*e.g.*, fig. 0.2, 4.21A-B).

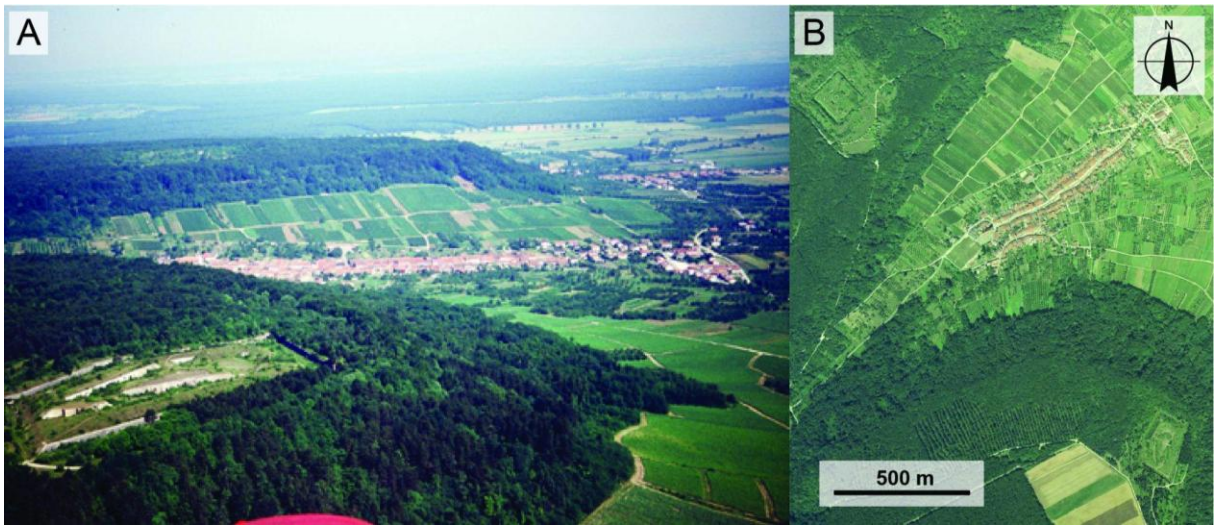


Figure 4.21 : Photographies aériennes de la côte de Meuse au nord-ouest de Toul. A : Cliché 92-0611 de la banque de données du LOTERR montrant les forts de Bruley (premier plan) et de Lucey (arrière-plan) disposés sur le revers de la côte de Meuse (28 juin 1992 à 11h ; Orientation NNO ; cl : R. Berton-A. Humbert) ; B : Cliché 317 de la mission 94SAA1242 de Remonter le temps représentant le même secteur (4 août 1994, IGN).

Certaines photographies aériennes obliques ont été interprétées en s'inspirant de la méthode du croquis d'interprétation photographique, telle que celle utilisée par Durup de Baleine (1998) dans sa démonstration de l'empreinte territoriale et paysagère des fortifications de la Boucle de la Moselle devant Toul. Cette méthode s'inscrit dans le cadre proposé par Humbert et al. (2013) et Humbert et Grandmontagne (2020), qui soulignent les apports de ces clichés, souvent moins déroutants que les prises de vue verticales aujourd'hui largement démocratisées.

Cette approche constitue ici une grille de lecture pour l'identification et la hiérarchisation des formes, sans avoir donné lieu à une formalisation graphique dans le manuscrit, l'analyse ayant été privilégiée à partir des données LiDAR et des documents cartographiques. Elle demeure néanmoins un complément méthodologique pertinent pour l'analyse fine de certains clichés et pourrait faire l'objet de développements spécifiques dans de futurs travaux.

Par la vision macroscopique qu'elles proposent, elles sont très pratiques pour étudier les paysages à travers une approche analytique, basée sur la perception des détails, et synthétique à partir de la perception des ensembles paysagers. Pour cela, l'entrée dans le paysage doit justement s'effectuer par ces grands ensembles, « *par le haut* », afin de saisir immédiatement les « *grandes articulations de l'agencement spatial d'une scène* », et se poursuivre jusqu'aux détails géographiques.

Humbert et al. (2013) parlent ainsi d'une approche descendante en trois niveaux que sont (i) celui des faciès, discriminant par des à-plats colorés les grands ensembles paysagers (*e.g.*, agricole, forestier, urbain, industriel) ; (ii) celui des sous-ensembles se distinguant selon des critères morphologiques (*e.g.*, noyau villageois, zone d'activité commerciale), fonctionnel (*e.g.*, fonction résidentielle, fonction commerciale) et/ou chronologique (*e.g.*, village médiéval, zone d'activité commerciale implantée dans les années 90) ; (iii) celui des objets géographiques qui décrivent un sous-ensemble (*e.g.*, église, hangar fonctionnaliste), qui l'expliquent (*e.g.*, rue principale, route départementale) et qui constituent un intrus (*e.g.*, parcelle agricole résiduelle).

Finalement, ces BD cartographiques, planimétriques et photographiques présentées dans la partie 4.2 viennent principalement en appui de l'analyse LiDAR, en apportant des éléments de contextualisation historique et paysagère utiles à l'interprétation des formes observées. La section suivante précise les modalités d'exploitation des données LiDAR aéroportées, qui constituent le cœur de la démarche analytique.

4.3. LiDAR aéroporté

La démarche d'exploitation des données LiDAR mobilisée dans ce travail s'inscrit dans le champ de l'archéologie en raison, d'une part, de la nature fondamentalement anthropique et culturelle de l'objet d'étude, les fortifications Séré de Rivières, et, d'autre part, de la maturité de l'expertise archéologique pour identifier, documenter et spatialiser les vestiges dans le paysage. Le recours à cette méthode situe ainsi l'étude à l'interface de l'archéologie et de la géomorphologie, conduisant en partie à l'adoption d'une approche archéogéomorphologique au sens de Thornbush (2012, 2013).

Cette démarche s'inscrit dans la continuité des recommandations de documentation et de standardisation formulées par Lozić et Štular (2021) à partir d'une analyse critique d'un corpus d'articles. Ces dernières sont notamment formalisées dans le guide d'utilisation des données LiDAR aéroportées en archéologie proposé par le *European Archaeological Council* en 2025 (EAC ; Bennett et al., 2025). Elle repose sur l'usage de protocoles méthodologiques et d'une terminologie normalisés, l'intégration systématique de métadonnées et de paradonnées, ainsi que sur une explicitation, autant que possible, de la part de subjectivité inhérente à l'interprétation.

L'objectif est de garantir la compréhension et la reproductibilité des résultats par une transparence méthodologique et une réflexivité assumée. En d'autres termes, cela n'informe « *pas uniquement sur ce qui est observé mais également sur comment les décisions ont été prises et comment les données sources ont été employées pour prendre des décisions* » (Lozić et Štular, 2021). Par ailleurs, cette approche répond à l'urgence de normaliser les pratiques face à la multiplication des couvertures LiDAR à l'échelle nationale et régionale (Kokalj et Somrak, 2019 ; Georges-Leroy, 2022).

La suite d'opérations effectuée se décline en 18 étapes, regroupées en 4 phases, décrites dans les sous-parties suivantes. Dans un premier temps, elles incombent traditionnellement à un prestataire réalisant l'acquisition et les premiers traitements, puis aux utilisateurs des données (tab. 4.9 ; fig. 4.22) : (i) l'acquisition et le traitement des données brutes, (ii) le traitement du nuage de points et la production de traitements dérivés, (iii) l'interprétation archéogéomorphologique et la gestion. La phase relative à la diffusion et à l'archivage des données (iv), bien que constitutive de la suite d'opérations complète, relève d'un prolongement méthodologique qui sera surtout envisagé à l'issue du travail doctoral, bien que des réflexions aient déjà été menées dans le cadre de la thèse.

Phase			Étape	Engagement archéo.
1	Acquisition et traitement des données brutes	1.1	Planification du projet	+
		1.2	Calibration du système d'acquisition	o
		1.3	Acquisition des données	o
		1.4	Enregistrement	+
		1.5	Ajustement des bandes	o
2	Traitement du nuage de points et du DFM	2.1	Classification automatique des points « sol »	++
		2.2	Classification des objets en « sursol »	++
		2.3	Reclassification manuelle	+++
		2.4	Interpolation du MNE	+
		2.5	Traitements de visualisation	+++
3	Interprétation archéologique	3.1	Intégration des données	++
		3.2	Inventaire cartographique	+++
		3.3	Cartographie automatique	++
		3.4	Interprétation approfondie	+++
		3.5	Validation de terrain	+++
4	Diffusion et archivage	4.1	Gestion des données	+
		4.2	Diffusion	+
		4.3	Archivage	+

Tableau 4.9 : Suite d'opérations mise en place pour l'exploitation des données LiDAR aéroportées. Les phases et étapes indiquées en vert ont été réalisées dans le cadre de la thèse. Engagement archéologique : o : non essentiel ; + : consultation ; ++ : important ; +++ : essentiel (d'après Lozić et Štular, 2021).

La réflexion méthodologique s'inscrit également dans le prolongement des principes énoncés par la Charte de Londres[19] pour la visualisation numérique du patrimoine culturel (Denard, 2012). Sans revendiquer une application exhaustive de ce cadre, conçu principalement pour des projets de restitution ou de médiation, ce travail en mobilise plusieurs principes fondamentaux, notamment la justification des choix méthodologiques, la distinction explicite entre données, hypothèses et interprétations, ainsi que l'attention portée à la documentation des sources et des processus de visualisation. Cette posture trouve un appui complémentaire dans les Principes de Séville (ICOMOS, 2017), qui précisent et déclinent les orientations de la Charte de Londres pour le champ spécifique de l'archéologie et des visualisations scientifiques. Ces principes constituent un cadre réflexif utile pour l'exploitation scientifique des données LiDAR et des SIG dans l'analyse des paysages fortifiés.

[19] http://www.londoncharter.org

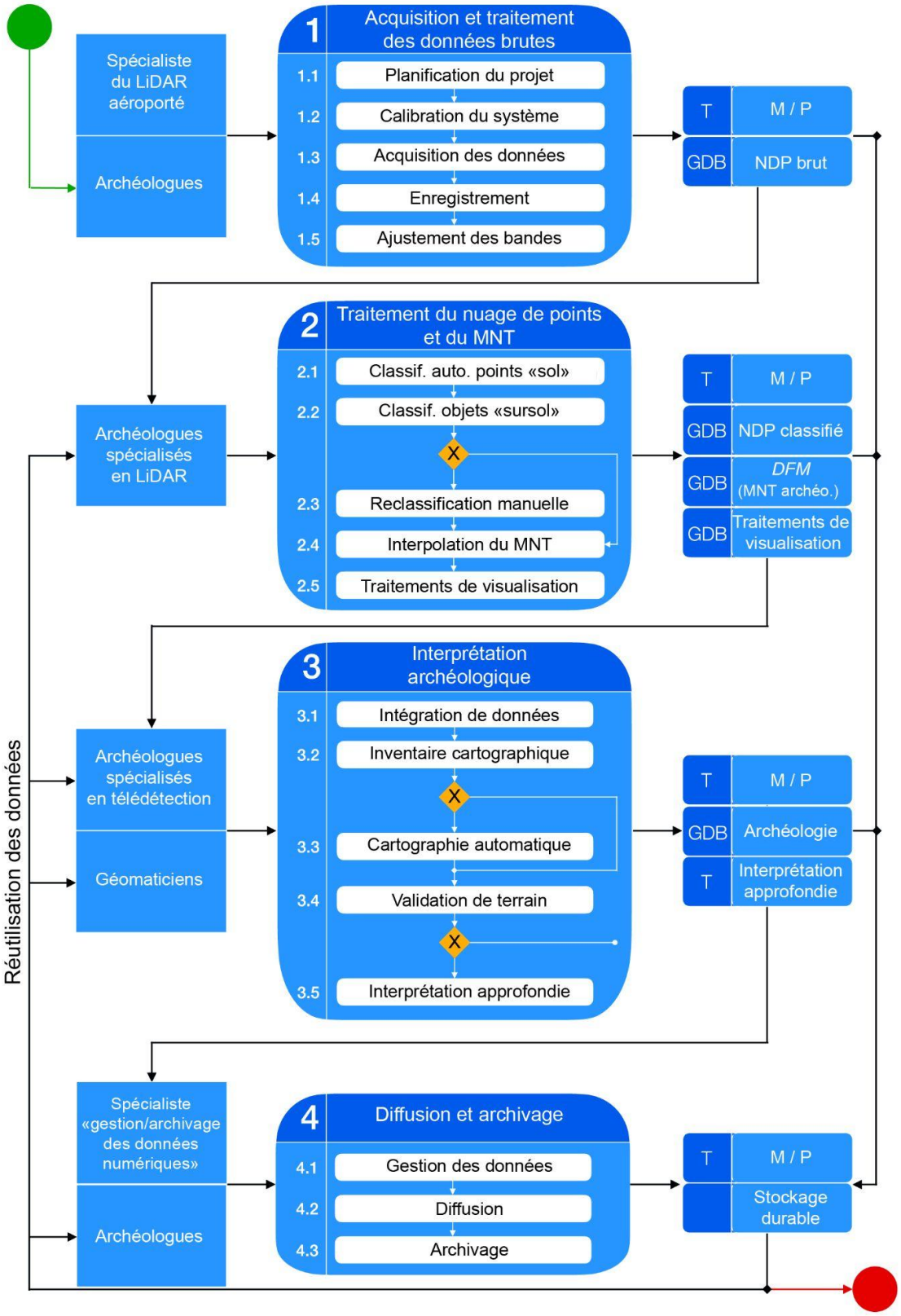


Figure 4.22 : Diagramme de la suite d'opérations mise en place pour le traitement des données LiDAR aéroportées spécifiques à l'archéologie. Les symboles représentant une entité externe, un processus, un flux de données et un stockage de données sont basés sur les notations de Gane et Sarson (1979), avec des notations supplémentaires pour les types de stockage de données (GDB, T ; traduit de Lozić et Štular, 2021). GDB : *Geodatabase* ; M : Métadonnées ; P : Paradonnées ; T : stockage de données descriptives (textuelles).

4.3.1. Acquisition et traitement des données brutes

La première phase d'acquisition et de traitement de la donnée brute se décline en quatre étapes généralement réalisées par le prestataire, successivement à l'étape de planification réalisée en concertation avec le commanditaire (Lozić et Štular, 2021).

- La *planification du projet* (1.1) est essentielle car elle conditionne l'entièreté du processus d'exploitation du LiDAR (Lozić et Štular, 2021). Une défaillance lors de cette étape peut par exemple entraîner l'acquisition d'une donnée topographique de mauvaise qualité (Ancelin et al., accepté).

- Le *calibrage du système* (1.2) prend en compte les besoins scientifiques, les conditions de vol (réglementaires et climatiques) et les caractéristiques de l'avion afin d'établir un plan de vol adéquat (Wehr, 2018).

- L'*acquisition des données* (1.3) se déroule selon le plan de vol et est subordonnée aux conditions atmosphériques et phénologiques (Poullain, 2014).

- Le *géoréférencement des données* (1.4) attribue une position géodésique à chaque impulsion laser par la combinaison des mesures de distance avec les informations de position issues du système de navigation par satellite (GNSS, *Global Navigation Satellite System*) et d'orientation fournies par la centrale inertielle (Wehr, 2018).

- L'*ajustement des bandes de vol* (1.5) consiste en l'optimisation de la qualité par la diminution voire la suppression du décalage entre les bandes (Toth et Koppanyi, 2018).

Dans le contexte de la démocratisation des capteurs LiDAR et du développement du vecteur drone, certaines acquisitions sont désormais conduites directement par les équipes de recherche, qui assurent elles-mêmes la captation et le traitement des données à très haute résolution, sans passer par un prestataire classique (*e.g.*, Stichelbaut et al., 2023).

Les données LiDAR exploitées dans le cadre de la thèse proviennent de trois acquisitions aéroportées financées par deux commanditaires distincts (fig. 4.23A-B). Les données lasergrammétriques les plus exhaustives et les plus précises sont issues de la campagne d'acquisition nationale LIDAR Haute Densité (2022-2026) menée par l'IGN (tab. 4.10). Elles proviennent de la dalle « MD » de 2 500 km² (fig. 4.23A), couvrant, de la Brie champenoise au Laonnois, les vallées de la Marne, de la Vesle et de l'Aisne ainsi que l'ensemble de la ceinture fortifiée de Reims (fig. 4.23B). Elle se divise en 2 500 nuages de points d'1 km², publiés au format binaire standard LAS (LAZ 1.4) conformes aux spécifications de l'*American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS) et déjà

classifiées par l'IGN. Ce travail se concentre sur 13 dalles de 1 km² intersectées par l'emprise d'un des forts de la ceinture de Reims (fig. 4.23B).

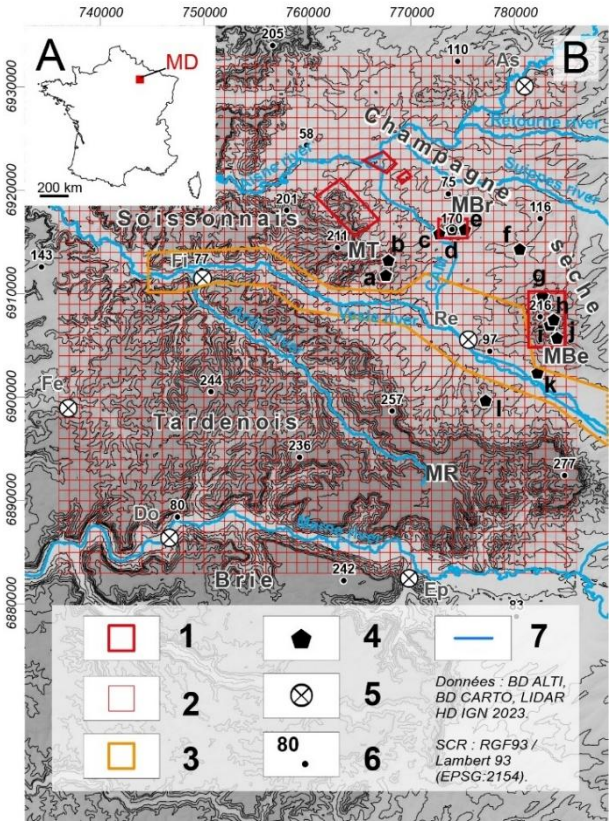


Figure 4.23 : Localisation des données LiDAR aéroportées. A : Carte de localisation de la dalle MD des données LIDAR HD. B : Couverture précise des données LiDAR aéroportées par rapport au secteur d'étude. 1 : Emprise du LiDAR IMPACT 14-18 (GEGENA, 2015) ; 2 : Dalles LIDAR HD d'1 km² ; 3 : Emprise du RGE ALTI® 1m (IGN, 2013) ; 4 : Fortifications de type Séré de Rivières ; 5 : Communes ; 6 : Points cotés (altitude en m NGF); 7 : Cours d'eau; a : Réduit de Chenay ; b : Fort de Saint-Thierry ; c : Batterie de Loivre ; d : Fort de Brimont ; e : Batterie du Cran de Brimont ; f : Fort de Fresne ; g : Fort de Witry-lès-Reims ; h : Batterie de Berru ; i : Vigie de Berru ; j : Fort de Nogent-L'Abbesse ; k : Fort de la Pompelle ; l : Fort de Montbré ; CAM : Canal de l'Aisne à la Marne ; Mbe : Mont de Berru ; MBr : Mont de Brimont ; MR : Montagne de Reims ; MT : Massif de Saint-Thierry ; Do : Dormans ; Ep : Épernay ; Fe : Fère-en-Tardenois ; Fi : Fismes ; Re : Reims.

L'acquisition s'est déroulée à la fin de l'hiver 2022-2023, garantissant des conditions phénologiques optimales propices à l'obtention d'un MNT à très haute résolution sous forêts caducifoliées (25 cm), cohérente avec une utilisation géomorphologique et archéologique. À l'inverse, une grande partie des dalles du sud de la France ont été levées en été dans le cadre de la lutte contre le risque incendie. Les spécifications et rapports d'acquisition et de traitement, n'ont pas encore été publiés à ce jour.

Cette campagne nationale succède à une première acquisition locale réalisée dans le cadre du programme IMPACT 14-18 piloté par le GEGENA, déjà utilisée dans l'étude des polémoformes (Taborelli et al., 2017a ; Devos et al., 2019b ; Ancelin et al., 2023). Le relevé a été réalisé sous un ciel dégagé au début de l'hiver 2015 par l'entreprise AERODATA via un LiDAR Riegl LM6800 à onde complète (ou *FWF*, *Full Waveform*), afin de couvrir un secteur fragmenté de 41 km² (tab. 4.10). Il comprend notamment les buttes-témoins de Berru (18 km²), à l'est, et de Brimont (5 km²), au nord, englobant ainsi le fort de Brimont, les batteries de Loivre et du Cran de Brimont, le fort de Witry-lès-Reims, la batterie et la vigie de Berru, et le fort de Nogent-l'Abbesse (fig. 4.23B).

Le RGE ALTI® 1 m de l'IGN, datant de 2013, a enfin été exploité dans le secteur du fort de la Pompelle. Il prend la forme d'un MNT créé à partir d'une acquisition menée sur le

corridor fluvial de la Vesle, par l'intermédiaire d'un capteur multi-échos non spécifié, dont la résolution permet la détection de polémoformes (fig. 4.23B).

Général	IMPACT 14-18 GEGENA	LIDAR HD IGN
Date	déc-15	fév.-mars 2023
Superficie	41 km²	2 500 km²
Capteur LIDAR	Riegl LM6800	/
Type de retour	FWF	/
Acquisition		
Nombre d'axes de vol	41 (3 transversal)	/
Hauteur de vol	650 m	/
Vitesse de vol	130 nœuds - 241 km/h	/
Recouvrement latéral	65 %	> 40 %
Fréquence d'émission laser	400 KHz	/
Largeur de fauchée	800 m	/
Angle de scan	60° (30x2)	30°
Statistiques du nuage de points		
SCR	RGF93 / Lambert 93	RGF93 / Lambert 93
Nombre de points « sol »	526 309 479	20 313 493 (1 km²)
Densité de points « sol »	12,8 pts/m²	20,3 pts/m² (1 km²)

Tableau 4.10 : Métadonnées et paradonnées des deux principaux relevés LiDAR aéroportés utilisés. Les statistiques du nuage de points du LIDAR HD ont été réalisées sur la dalle forestière du fort de Saint-Thierry (fig. 4.24A-D).

4.3.2. Traitement du nuage de points et traitements dérivés

4.3.2.1. Classification

Les étapes de *classification automatique* (2.1, 2.2) et le *contrôle manuel des données* (2.3) ont été réalisées par les prestataires (tab. 4.9). Elles aboutissent à l'utilisation de 5 et 11 classes conformes aux préconisations de l'ASPRS (à l'exception de trois classes personnalisées de l'IGN) dont les principales sont le sol (classe 2), utilisé pour la création des MNT, la végétation (classes 3, 4 et 5) et le bâti (classe 6 ; annexe 39).

La qualité du nuage de points LiDAR classifié a été évaluée au moyen d'une analyse statistique spatiale fondée sur une rastérisation du nuage, non pas à partir des valeurs d'altitude (Z), mais à partir du nombre de points classés « sol ». Cette approche permet de produire des cartes de densité spatiale des points ayant effectivement atteint le sol (Ancelin et al., accepté). Ces cartes ont été générées à l'aide du logiciel ArcGIS 10.3 et l'outil « Statistiques de points LAS sous forme de raster » (*cf.* protocole détaillé en annexe 40).

Pour le LIDAR HD, la densité de points classés « sol » varie de manière attendue en fonction de l'occupation du sol (Ancelin et al., accepté). Elle atteint environ 70 pts/m² sur les dalles des forts sur avant-butte sur craie situés en milieu agricole ouvert, offrant une restitution très fine des microformes topographiques, et diminue nettement dans les secteurs intra-forestiers, où la végétation intercepte une part plus importante des impulsions laser. À titre illustratif, la dalle du fort de Saint-Thierry, située au cœur du massif forestier éponyme, totalise 20 313 493 points ayant atteint le sol, soit une densité moyenne d'environ 20,3 pts/m² (fig. 4.24A-D).

La carte de densité, produite à la résolution d'exploitation des données (25 cm), met en évidence une bonne isotropie des cellules du MNT interpolé, malgré des absences de données représentant environ 21,5 % de la surface[20]. Les zones sans données s'expliquent par la présence de surfaces bâties, non intégrées au MNT, de plans d'eau absorbant les impulsions, et surtout par la structure du peuplement forestier, en particulier la bande située à l'est du fort, majoritairement constituée de pinèdes (fig. 4.24D).

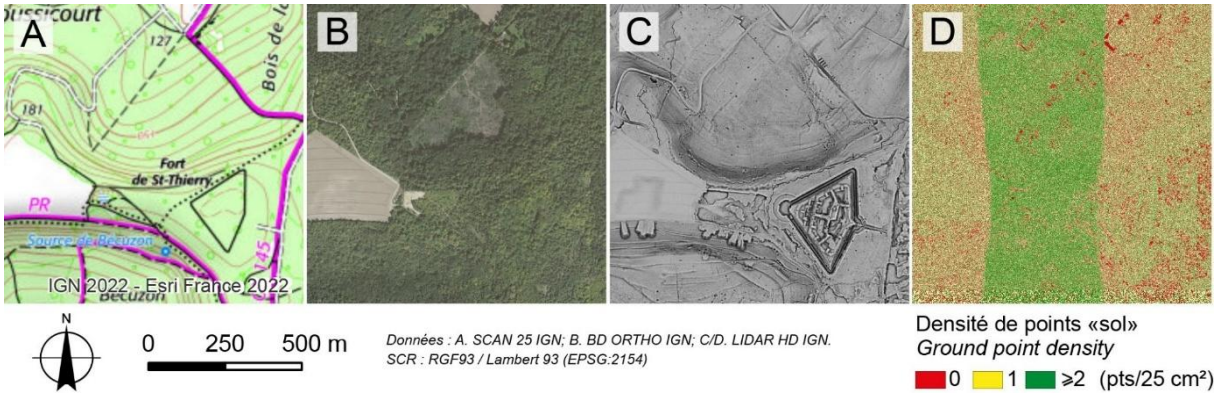


Figure 4.24 : Fort de Saint-Thierry situé sur la commune de Pouillon. A : Carte topographique (2022). B : Orthophotographie (2019). C : MNT LIDAR HD traité visuellement (indice de pente + LRM en transparence ; 2023). D : Carte de densité de points « sol » par pixels de 25 cm².

Pour le LiDAR IMPACT 14-18, la densité de points « sol » est d'environ 13 pts/m² sur les buttes de Brimont et de Berru. Les statistiques et la carte de densité, proposées pour une résolution de 50 cm, conforme à l'échelle d'exploitation du LiDAR établie dans les cahiers des charges, indiquent une absence de données sur environ 3,5 % de la superficie, ainsi que la bonne isotropie des points ayant atteint le sol (fig. 4.25A-D).

[20] Ces proportions diminuent fortement lorsque la résolution est dégradée, avec 0,3 % à 1 m et 0,8 % à 50 cm.

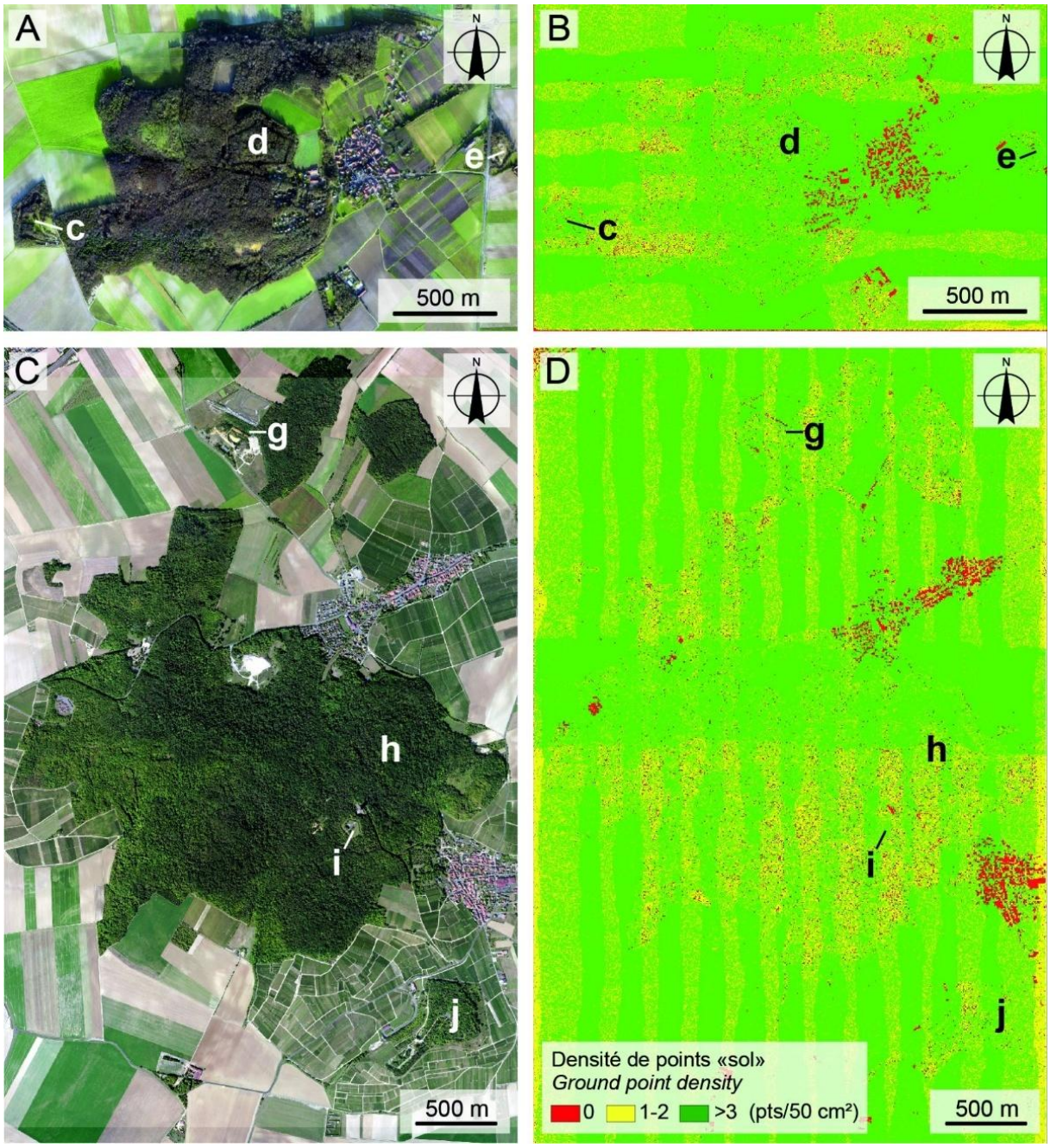


Figure 4.25 : Comparaison de l'orthophotographie et de la carte de densité de points « sol » du LiDAR IMPACT 14-18 du Mont de Brimont (A-B) et du Mont de Berru (C-D). A : Orthophotographie LiDAR IMPACT 14-18 ; C : Orthophotographie IGN (BD ORTHO, 2020) ; B-D : Carte de densité de point « sol » à une résolution de 50 cm. c : Batterie de Loivre ; d : Fort de Brimont ; e : Batterie du Cran de Brimont ; g : Fort de Witry-lès-Reims ; h : Batterie de Berru ; i : Vigie de Berru ; j : Fort de Nogent-l'Abbesse.

Une *vérification et reclassification manuelle des données LIDAR HD* (2.3) publiées en 2023 ont été menées afin d'évaluer la qualité de la classification de l'IGN, qui est appliquée sur plusieurs milliers de km² à la fois. En raison du temps nécessaire à cette tâche, l'effort a été concentré sur les fortifications et leur environnement immédiat (*cf.* protocole de l'annexe 41). Ce contrôle repose sur une série de corrections discrètes (au sens statistique du terme) effectuées selon des critères subjectifs (Lozić et Štular, 2021) à l'aide du logiciel

CloudCompare v2.12.4 (Kyiv). L'exemple du fort de la Pompelle illustre cette démarche (fig. 4.26A-C). Le MNT initial, interpolé à partir du nuage de points classifié par l'IGN, présente une absence de données sur la partie septentrionale du casernement, générant ainsi un artefact numérique (fig. 4.26A). La reclassification manuelle a mis en évidence une erreur de classification (fig. 4.26B), les points manquants ayant été attribués aux catégories bâti, végétation (basse, moyenne, haute) ou n'ayant pas été classifiés (fig. 4.26C).

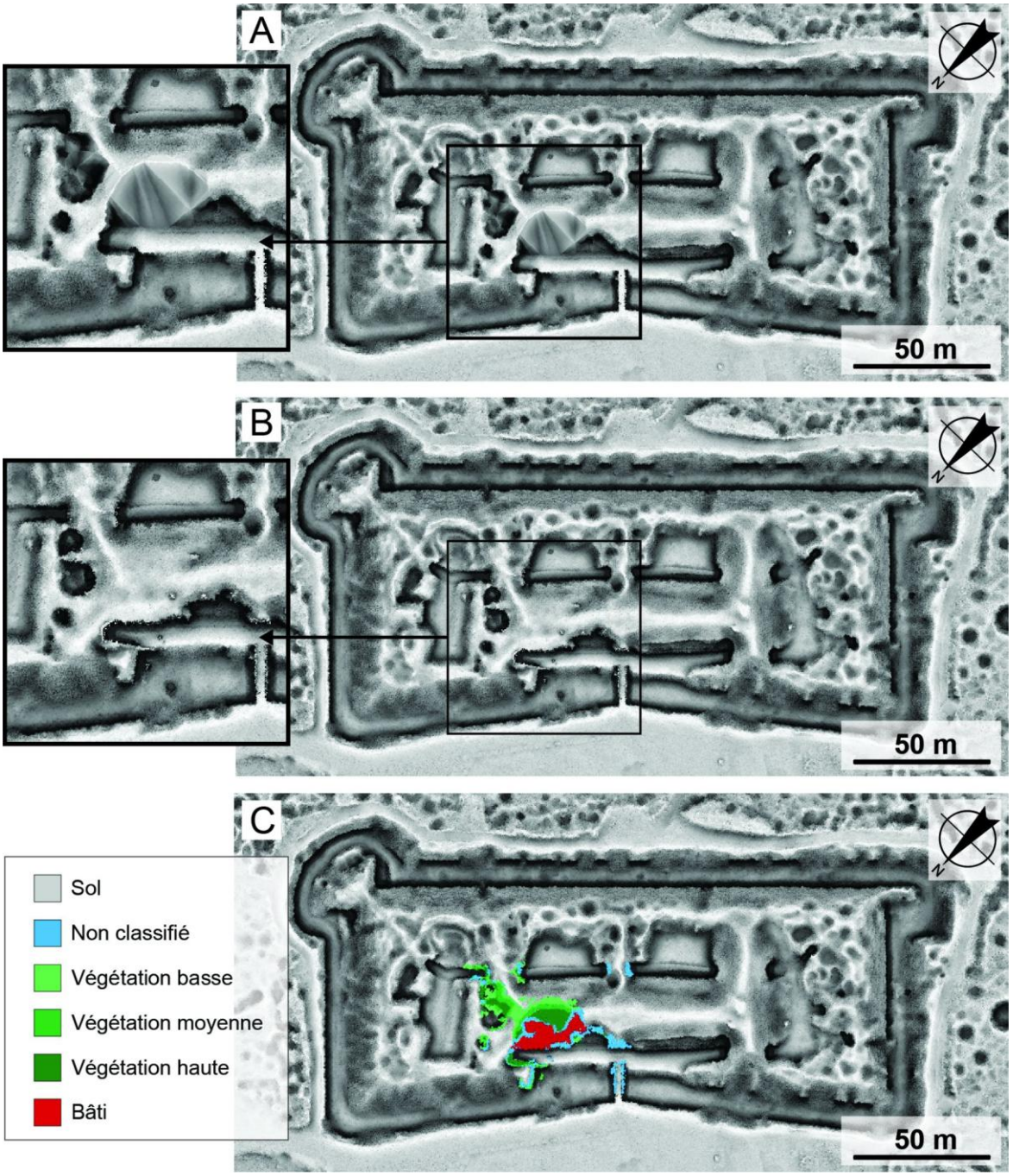


Figure 4.26 : Localisation des points reclassés manuellement sur la dalle LIDAR HD du fort de la Pompelle. A : Classification automatique ; B : Reclassification manuelle ; C : Sources des erreurs reclassifiées.

4.3.2.2. Interpolation du Modèle numérique de terrain (MNT)

Après la classification, l'*interpolation du nuage de points* LiDAR (2.4) consiste en une étape de rastérisation permettant de produire des images de plusieurs millions de pixels correspondant à des modèles altimétriques, regroupés sous l'appellation de modèles numériques d'élévation (MNE). Ces modèles constituent des représentations numériques de la topographie et, selon les classes de points mobilisées, des objets de surface naturels et/ou anthropiques. Chaque pixel est associé à une valeur altitudinale (z) issue de l'interpolation du nuage de points.

La sélection des classes et des paramètres de traitement conditionne la nature du modèle généré. L'utilisation exclusive des points classés « sol » permet de produire un MNT, représentant une topographie normalisée, débarrassée des objets de surface. À l'inverse, le recours à des paramètres de classification et de filtrage volontairement contraints vise à limiter l'effacement de structures d'intérêt lors de la normalisation du relief et conduit à la production d'un « modèle numérique de vestiges » (*Digital Features Model*, DFM ; Štular et al., 2021b). Enfin, l'intégration des points dits « sursols » permet de produire un modèle numérique de surface (MNS), restituant l'enveloppe supérieure des éléments naturels et anthropiques (végétation, bâtiments, infrastructures).

Dans cette étude, le nuage de points classifié fourni par le prestataire au format « .las » a été principalement converti en MNT, qui constitue le socle de l'approche archéogéomorphologique développée dans cette thèse. Le traitement des données a été réalisé par interpolation *binning* (agrégation des valeurs d'élévation par classe ou fenêtre) autour de valeurs centrales (moyenne, médiane, mode), à l'aide de l'outil « Jeu de données LAS vers raster » du logiciel ArcGIS 10.3 (paramètres : pondération par l'inverse de la distance, voisins naturels ; fig. 4.27). Cette méthode a permis de produire des MNT à une résolution de 50 cm (LiDAR IMPACT 14-18) et 25 cm (LIDAR HD).

De manière plus ponctuelle, des modèles numériques de vestiges ont été générés au droit de certains sites fortifiés par reclassification manuelle du nuage de points, afin de préserver des structures supprimées lors de l'interpolation du MNT, comme les murs à bahut de l'escarpe du fort de Montbré. Pour cela, le même protocole que celui employé pour le réglage des problèmes de classification a été appliqué (annexe 41 ; fig. 4.26A-C).

Une fois les modèles numériques générés, leur exploitation repose sur la réalisation de traitements de visualisation, étape intermédiaire essentielle qui conditionne la lisibilité des formes du relief et oriente l'interprétation morphologique.

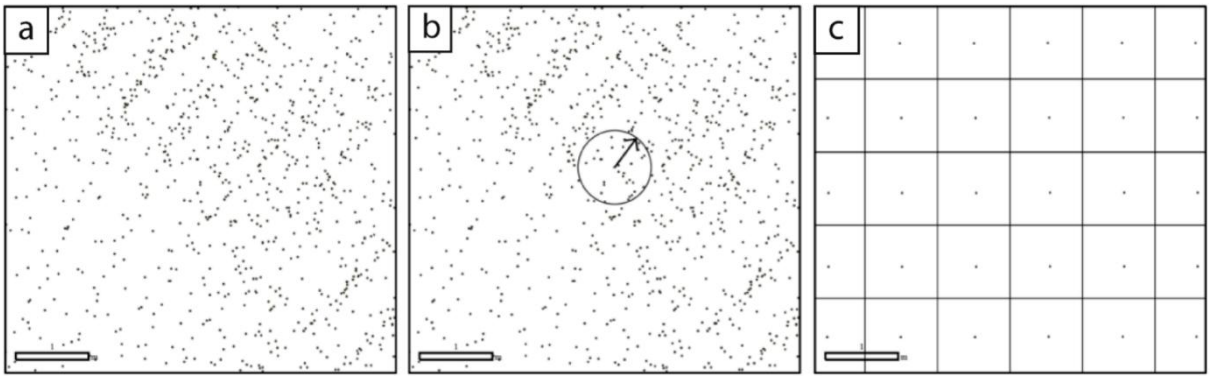


Figure 4.27 : Schéma théorique de l'interpolation d'un nuage de points brut en MNT. À partir d'un nuage de points irrégulièrement réparti dans l'espace (a), en MNE. Selon diverses méthodes, la valeur d'un point d'un rayon déterminé est estimée en fonction de la valeur des points voisins (b) et aboutit à la création d'un réseau de points maillés et réguliers (c) indispensable à la création d'un raster d'élévation (Simon Ritz, ressource pédagogique universitaire).

4.3.2.3. Traitements de visualisation

Les fortifications Séré de Rivières constituent des ensembles défensifs complexes, caractérisés par une architecture semi-enterrée et une intégration au relief naturel (Durup de Baleine, 1998 ; Ancelin et al., 2023). Leur analyse, à partir des données LiDAR, repose ici sur la capacité des *traitements de visualisation* (2.5) à révéler ces méga-polémoformes, généralement masquées par la végétation, afin d'identifier les morphologies associées, qui peuvent être soit des reliefs en élévation par rapport à leur environnement (glacis, parapets, caponnières, remparts), soit des formes en creux (fossés, terre-pleins, rue du rempart ; fig. 2.18A-B), de même que les modifications du paysage résultant de leur fonctionnement ou de leur réutilisation. La fonction de ces traitements est, certes, exploratoire, en offrant une vue d'ensemble de la variété et de la répartition des anomalies topographiques (De Matos-Machado, 2018 ; Ancelin, 2020). Mais surtout, ils constituent la base d'une stratégie d'enregistrement, visant à inventorier les informations topographiques contenues dans le MNT, pouvant être d'intérêt archéologique (Nuninger et al., 2010 ; Ancelin, 2020), géomorphologique (Höfle et Rutzinger, 2011 ; Berthe et al., 2022), voire précisément archéogéomorphologique et militaire (Hesse, 2014 ; De Matos-Machado, 2018 ; Ancelin et al., 2023, 2024).

La principale approche d'exploitation des données LiDAR s'est longtemps appuyée sur l'interprétation de ces traitements dérivés des MNT, ce qui a entraîné une diversification croissante des méthodes, rendant leur sélection parfois complexe (Crutchley et Crow, 2010). Face à cette prolifération, de nombreux travaux d'évaluation et de comparaison ont émergé au cours des deux dernières décennies pour en faciliter l'usage et accompagner les utilisateurs (annexe 42 ; Challis et al., 2011 ; Štular et al. 2012 ; Bennett et al., 2012 ; Mayoral et al., 2017 ; Kokalj et Somrak, 2019 ; Guyot et al., 2021). Deux enjeux majeurs s'en dégagent : la perception et la complémentarité des traitements.

Le contraste entre pixels adjacents, qui influe directement sur la lisibilité des images, constitue un critère fondamental pour évaluer la pertinence d'un traitement dans la détection des anomalies topographiques (Štular et al., 2012 ; Mayoral et al., 2017). Parallèlement aux qualités intrinsèques des traitements (Mayoral et al., 2017), Kokalj et Somrak (2019) soulignent l'impact des biais cognitifs. L'interprétation des résultats dépend non seulement de l'acuité visuelle, concentrée sur une portion réduite du champ de vision (fovéa, annexe 43), mais aussi d'une perception subconsciente privilégiant les formes familières et recherchées (biais de confirmation). Dès lors, la lecture d'images nécessite un balayage oculaire méthodique, dont l'efficacité est conditionnée par l'attention et l'expérience de l'opérateur. L'influence de ces facteurs a été démontrée par Štular et al. (2012 ; annexe 44) et Chevigny et al. (2018 ; annexe 45), qui ont mis en évidence la variabilité des résultats selon les caractéristiques individuelles et la subjectivité des analystes chargés de l'identification et de la cartographie des formes topographiques.

Le second enjeu majeur concerne l'adéquation et la complémentarité des traitements. Malgré leur diversité, aucune technique de visualisation ne s'avère pleinement satisfaisante isolément (Challis et al., 2011 ; Štular et al., 2012 ; Mayoral et al., 2017), car aucune ne répond simultanément aux critères définissant un traitement optimal selon Kokalj et Somrak (2019) :

- Visibilité claire des formes à grande échelle.
- Image intuitive et aisément interprétable.
- Indépendance de l'efficacité vis-à-vis de l'orientation et de la morphologie des anomalies.
- Adaptabilité à tout type de relief.
- Absence ou limitation des artéfacts de calcul.
- Génération à partir d'un raster.
- Possibilité d'analyse sur toute la plage de valeurs.

Dès lors, l'association de plusieurs traitements complémentaires apparaît comme la stratégie la plus pertinente pour limiter les risques de sous-estimation des structures ou de mauvaise interprétation des anomalies liées aux résidus numériques (Challis et al., 2011 ; Bennett et al., 2012 ; Štular et al., 2012 ; Mayoral et al., 2017).

À ce titre, tous les principaux traitements de visualisation ont été explorés dans le cadre de la thèse. Ils sont notamment décrits dans le livre « *ALS raster data visualization, a guide of good practice* » de Kokalj et Hesse (2017), et régulièrement évoqués dans des travaux universitaires postérieurs (*e.g.*, en région Grand-Est, De Matos-Machado, 2018 ; Ancelin, 2020 ; Ritz, 2020, Berthe, 2024).

Seuls sept traitements, utilisés à différentes reprises sont présentés ci-après (tab. 4.11 ; fig. 4.28A-F), dont trois revêtent une utilisation systématique. Ils ont été réalisés à l'aide du logiciel ArcGIS 10.3 et du logiciel RVT (*Relief Visualisation Toolbox*) pour les plus complexes (Zakšek et al., 2011 ; Kokalj et Somrak, 2019). Ces méthodes reposent sur deux approches : l'analyse de la lumière et l'analyse topographique (De Matos-Machado, 2018).

Traitement (VT)	Paramètres (setting)	Logiciel (software)
Ombrage unidirectionnel	Zenith (0-90°) = 35° Azimut = 0-360° Étirem. d'histo. = écarts-types (n : 2,5)	*ArcGIS Spatial Analyst*
Ombrage multidirectionnel	Zenith (0-90°) = 35 ° Nombre de directions = 16 Étirem. d'histo. = écarts-types (n : 2,5)	*RVT 2.2.1*
SVF	Zenith (0-90°) = 35 ° Nombre de directions = 16 Étirem. d'histo. = écarts-types (n : 2,5)	*RVT 2.2.1*
Indice de pente	Étirem. d'histo. = écarts-types (n : 4)	*ArcGIS Spatial Analyst*
Modèle de relief local (*LRM*)	Rayon (en m) = Microformes : 10 / 20 ; Macroformes : > 50 Étirem. d'histo. = écarts-types (n : 2,5)	*RVT 2.2.1*
Indice de position topographique (*TPI*)	Type de voisinage = cercle Rayon (en px) = Microformes : 10 / 20 ; Macroformes : > 50 Étirem. d'histo. = écarts-types (n : 2,5)	*Topography Tools 10.3 opensource - ArcGIS*
e⁴MSTP	Onglet *Blender* Blend combination : e4MSTP	*QGIS 3.28.12 plug-in RVT 2.2.1*

Tableau 4.11 : Paramètres standards utilisés pour le traitement et la visualisation des différents indices.

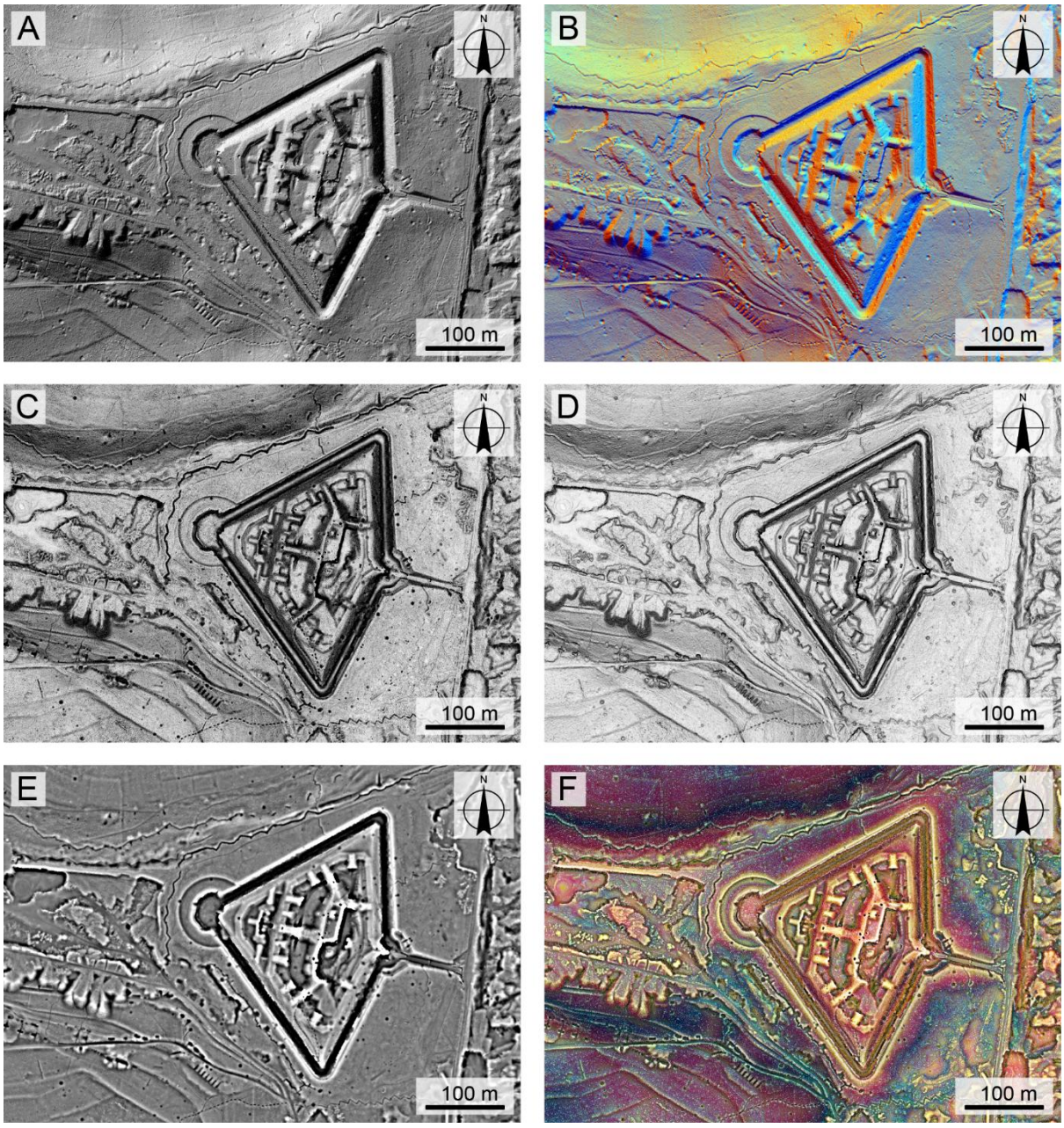


Figure 4.28 : Traitements de visualisation utilisés dans l'étude des polémoformes Séré de Rivières. A : Ombrage unidirectionnel (angle zénithal : 35° ; azimut : 315°) ; B : Ombrage multidirectionnel en composition RGB (rouge, vert, bleu), combinant trois directions d'illumination (angle zénithal : 35° ; nombre de directions : 16) ; C : Sky-view Factor (rayon de recherche : 10 m ; nombre de directions : 16) ; D : Indice de pente ; E : Modèle de relief local (LRM ; rayon de recherche : 20 m) ; F : Traitement e^{4}MSTP.

L'ombrage (*analytical hillshading* ; fig. 4.28A), développé par Yoëli en 1965, simule un éclairage artificiel du relief en reproduisant la lumière solaire afin de générer des zones d'ombre et de contraste (Štular et al., 2012 ; De Matos-Machado, 2018). La lisibilité des anomalies topographiques dépend de l'orientation de la source lumineuse, définie par l'azimut et le zénith (tab. 4.11). Son efficacité pour la détection des formes topographiques est démontrée depuis les années 1920, époque où la photographie aérienne prise avec un faible angle d'élévation du soleil produisait un ombrage rasant favorable à la cartographie

archéologique (Devereux et al., 2008). En reposant sur des principes similaires à ceux de la photographie aérienne facilitant l'interprétation des résultats, cette technique demeure la plus accessible (Chase et al., 2017). De plus, elle constitue la méthode de visualisation la plus simple et la plus immédiate à générer, à condition de bien paramétrer les réglages (Nuninger et al., 2010 ; Georges-Leroy et al., 2011 ; Kokalj et al., 2011 ; Bennett et al., 2012 ; Georges-Leroy, 2013). Cette facilité d'utilisation et d'interprétation explique que les données LIDAR HD soient diffusées au grand public via ce traitement sur la plateforme Géoportail. Son interprétation présente cependant deux limites majeures (Devereux et al., 2008 ; Schindling et Gibbes, 2014 ; Chevigny et al., 2018) :

- Dépendance aux paramètres d'éclairage : la détection complète des structures nécessite de multiplier les images avec des configurations d'azimut différentes, car les vestiges alignés parallèlement à la source lumineuse sont peu ou pas visibles.

- Effet des ombres portées : en terrain accidenté et avec un éclairage rasant, certaines anomalies peuvent être occultées par des zones d'ombre, réduisant ainsi la fiabilité de l'interprétation.

Pour remédier aux limites de l'ombrage unidirectionnel, l'ombrage multidirectionnel (*multi-directional hillshading* ; fig. 4.28B) constitue une alternative en intégrant, sur une même image, un éclairage artificiel provenant de plusieurs azimuts (Devereux et al., 2008 ; Nuninger et al., 2010 ; Challis et al., 2011 ; Georges-Leroy et al., 2011 ; Kokalj et al., 2011). Ce traitement repose sur la définition d'un nombre de directions d'illumination, réparties uniformément sur 360°, en complément du réglage de l'angle zénithal (tab. 4.11). Certains auteurs, soulignant que cette méthode peut engendrer des illusions d'optique et une redondance de l'information, préconisent la réalisation d'analyses en composantes principales (ACP ; *e.g.*, Devereux et al., 2008), non utilisées dans ce travail. Cette technique statistique multivariée applique une transformation mathématique destinée à synthétiser les informations issues des différentes directions d'éclairage. Selon Devereux et al. (2008), les deux premières composantes concentrent 95 % de l'information, tandis que les trois premières en restituent 99 %.

Le *Sky-View Factor* (SVF), développé par Kokalj et al. (2011), simule une illumination diffuse, corrigeant ainsi les limites directionnelles des méthodes classiques (Štular et al., 2012 ; fig. 4.28C). Ce traitement quantifie la portion de ciel visible depuis un point donné, permettant de différencier les zones fortement exposées à la lumière (rendues en blanc) de celles recevant peu d'énergie lumineuse (en noir ; Kokalj et al., 2011 ; Kokalj et Somrak, 2019). Les paramètres principaux de ce traitement reposent sur le nombre de directions d'analyse et le rayon de recherche (tab. 4.11). Grâce à sa capacité à révéler des anomalies topographiques indépendamment de l'orientation de l'éclairage, le SVF s'est imposé comme

un outil incontournable dans l'analyse des données LiDAR aéroportées, notamment en géographie et en archéologie (Nuninger et al., 2010 ; Kokalj et al., 2011 ; Zakšek et al., 2011 ; Chase et al., 2017 ; De Matos-Machado, 2018).

Avec l'ombrage, la pente (*slope* ; fig. 4.28D) figure parmi les traitements les plus utilisés en raison de son intelligibilité, de sa simplicité de calcul et de sa facilité d'utilisation (Bennett et al., 2012 ; De Matos-Machado, 2018 ; tab. 4.11). Basé sur la mesure de la différence d'altitude maximale entre un pixel et ses voisins, cet indice constitue un moyen rapide et efficace pour révéler les aspérités du relief (Kokalj et Hesse, 2017 ; De Matos-Machado, 2018). Bien que performant dans de nombreux contextes (Challis et al., 2011), l'indice de pente ne permet pas de différencier les formes convexes et concaves (Kokalj et Hesse, 2017 ; Kokalj et Somrak, 2019). Pour optimiser son interprétation, l'usage de niveaux de gris est généralement privilégié, bien que les palettes de couleurs restent pertinentes pour discriminer différentes classes de pente (Štular et al., 2012 ; Kokalj et Somrak, 2019).

Le Modèle de relief local (*Local Relief Model*, LRM ; fig. 4.28E), développé par Hesse (2010), repose sur la soustraction entre le MNT initial et un MNT lissé, obtenu par l'application d'un filtre passe-bas, qui restitue la tendance topographique générale (Hesse, 2010 ; Kokalj et Hesse, 2017). L'image résultante correspond à un relief résiduel, dans lequel les valeurs positives et négatives traduisent respectivement des formes convexes et concaves, tandis que les valeurs proches de zéro indiquent une absence de variation locale significative. Le paramétrage du lissage, notamment la taille du noyau, conditionne directement l'échelle des formes révélées et doit être ajusté en fonction des dimensions des objets recherchés (Štular et al., 2012). Contrairement aux méthodes reposant sur des effets d'illumination, le LRM fournit une information métrique directe sur les hauteurs et profondeurs relatives des formes, ce qui le rend particulièrement adapté à l'analyse de structures de petite taille. Il présente toutefois des limites pour les formes de grande emprise ou en terrain fortement incliné, où le lissage peut générer des artefacts et des bourrelets périphériques susceptibles de biaiser l'interprétation (Kokalj et Hesse, 2017).

L'Indice de position topographique (*Topographic Position Index*, TPI), développé à la fin des années 1990, mesure l'écart d'altitude entre un pixel donné et un niveau de référence correspondant à la moyenne des pixels environnants (Jenness, 2006). Son efficacité dépend de la taille du voisinage définie en fonction de l'échelle d'analyse (**tab. 4.11**). De la même manière que le *LRM*, cette méthode offre une visualisation performante aussi bien pour les macroformes que pour les microformes. Le TPI se révèle particulièrement adapté à l'identification des grandes structures topographiques (*e.g.*, vallées, plateaux, montagnes) et permet de distinguer la concavité du terrain (valeurs négatives) de sa convexité (valeurs positives ; De Matos-Machado, 2018 ; Jenness, 2006).

L'*Enhanced Multiscale Topographic Position* (e⁴MSTP*)* est une visualisation composite destinée à représenter, au sein d'une même image, la position topographique relative à différentes échelles et les caractéristiques morphologiques locales du relief (fig. 4.28F ; Guyot et al., 2018 ; Guyot et al., 2021). Elle repose sur la combinaison d'une image de *Multiscale Topographic Position* (MSTP), synthétisant les écarts d'altitude à plusieurs fenêtres spatiales, avec des visualisations morphologiques telles que la pente et l'ouverture topographique positive et négative (Chiba et al., 2008 ; Lindsay et al., 2015). La fusion de ces traitements permet de renforcer la lisibilité des anomalies topographiques à différentes échelles, indépendamment de leur orientation. L'e⁴MSTP est principalement utilisé comme outil de détection et de repérage multiscalaire des formes topographiques, mais reste peu adapté à une analyse morphométrique et une interprétation morphologique fine (Kokalj et Čož, 2025).

Dans le cadre de cette thèse, une démarche protocolaire a été adoptée afin d'optimiser la précision et la rapidité d'interprétation des données LiDAR (Challis et al., 2011). Cette approche repose sur un cadre empirique associant analyse critique de la littérature scientifique, expérimentations méthodologiques et retours d'expérience. Elle s'inscrit en réaction à plusieurs problématiques récurrentes dans l'exploitation des techniques de visualisation du relief : la multiplication anarchique des traitements, la faible considération pour les bases théoriques et un manque de systématisation dans l'évaluation des résultats, limitant la reproductibilité et l'objectivité des interprétations (Kokalj et Somrak, 2019 ; Lozić et Štular, 2021).

Trois traitements de visualisation standardisés ont pour cela été retenus pour garantir une lecture morphologique efficace et reproductible :

- L'ombrage (fig. 4.28B) : méthode intuitive et naturelle, elle facilite l'acclimatation aux données en offrant une lecture proche de la perception visuelle humaine. Cette approche permet une première exploration des structures sans nécessiter de paramétrage complexe.

- L'indice de pente (fig. 4.28D) : technique robuste qui met en évidence les ruptures topographiques sans altérer la morphologie des microformes, évitant ainsi la création d'artéfacts susceptibles d'induire des erreurs d'interprétation.

- Le LRM (fig. 4.28E) : permet de distinguer concavités et convexités sur plusieurs échelles, offrant une grille d'analyse particulièrement adaptée à la détection et à la caractérisation des formes polémoformes et des fortifications Séré de Rivières.

La figure 4.29A-B illustre le processus de production des traitements de visualisation appliqués au MNT. Plusieurs facteurs clés (1) influencent la création de ces images dérivées (2), impactant leur capacité à mettre en évidence les anomalies topographiques. Des post-traitements spécifiques (4,5,6) sont ensuite appliqués pour optimiser le contraste et améliorer la lisibilité des visualisations. Enfin, ces traitements peuvent être combinés (6), soit via des méthodes de fusion, tel que le VAT (*Visualization for Archaeological Topography*) proposé par Kokalj et Somrak (2019) ou le e⁴MSTP proposé par Guyot et al. (2021), par l'intermédiaire de la RVT, soit par superposition avec ajustement de l'opacité. Alors que certains auteurs combinent de la sorte l'indice de pente avec les courbes de niveau (Nuninger et al., 2010, 2014 ; De Matos-Machado, 2018) ou l'ombrage (Laplaige, 2012 ; Štular et al., 2012), la principale combinaison utilisée dans ce travail consiste en la superposition de l'indice de pente et du LRM, lequel est représenté soit via une palette de couleurs (fig. 4.29B), soit en nuances de gris (fig. 4.30).

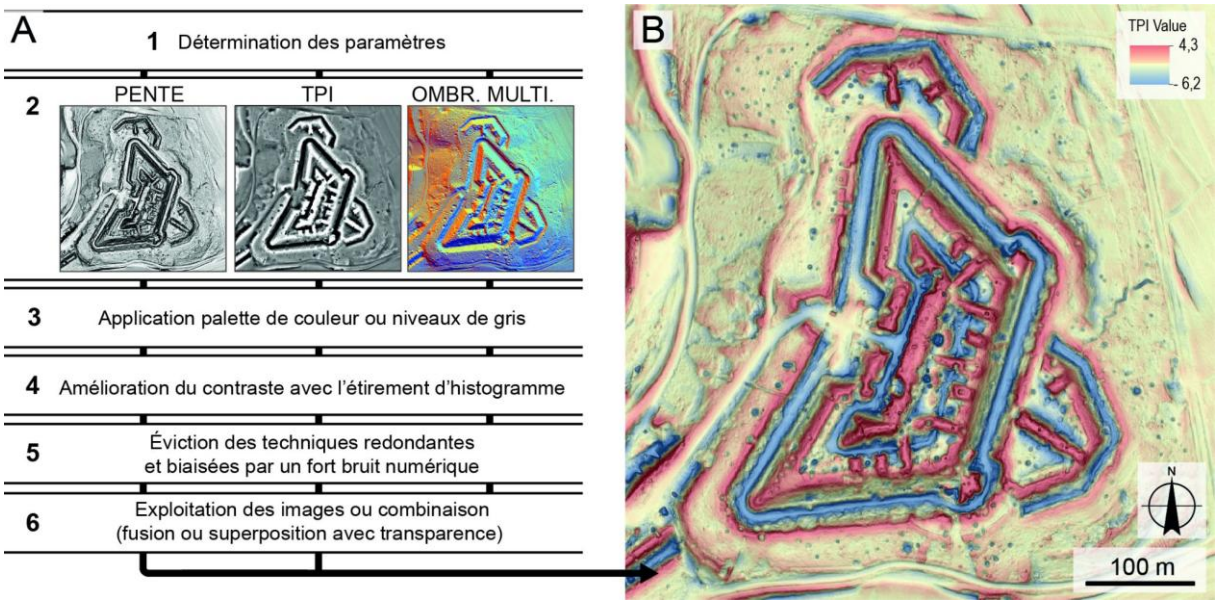


Figure 4.29 : Suite d'opérations effectuée dans l'exploitation des traitements de visualisation afin de détecter puis cartographier les anomalies topographiques. A : Suite d'opérations effectuées pour le traitement visuel du MNT ; B : MNT traité visuellement via la superposition d'un indice de pente et d'un LRM.

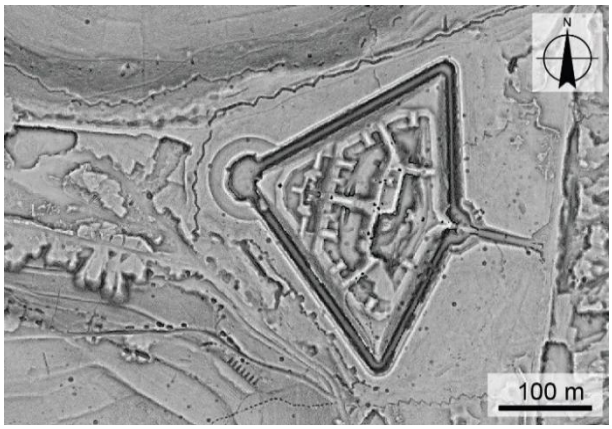


Figure 4.30 : MNT LIDAR HD traité visuellement via la superposition d'un indice de pente et d'un LRM en transparence. Il s'agit de la combinaison de traitements de visualisation la plus utilisée dans cette thèse.

À l'issue de la phase de production du MNT et des traitements dérivés, le travail de cartographie et d'interprétation scientifique peut être entrepris.

4.3.3. Interprétation archéo(géomorpho)logique

Cette phase d'interprétation repose sur une lecture croisée des formes révélées par le LiDAR et de sources complémentaires, afin de replacer les polémoformes dans leur contexte morphologique, historique et fonctionnel.

4.3.3.1. Intégration de données complémentaires

L'*intégration de données complémentaires* (3.1) vise à enrichir l'analyse LiDAR en croisant différentes sources spatiales afin de faciliter la caractérisation des anomalies topographiques détectées. Cette étape repose sur l'incorporation de documents d'archives, cartographiques et planimétriques, qui nécessitent soit un téléchargement lorsqu'ils sont publiés en ligne (*e.g.*, plans directeurs aux AD51 ; *cf.* partie 4.1.2.1), soit une numérisation sur site lorsque les documents sont conservés sous format physique (*e.g.*, plans de construction du fort de Brimont, SHD ; fig. 4.1). Une BD vectorielle a également été constituée pour certains documents afin d'en faciliter l'exploitation sous SIG. Lorsqu'elles contiennent des références géographiques exploitables, certaines données manuscrites extraites d'archives peuvent être également intégrées au SIG (*e.g.*, JMO attestant des tirs d'ALVF sur les forts de Reims ; *cf.* partie 4.1.1.2).

La figure 4.31A-D illustre l'intérêt du croisement entre différentes sources pour l'interprétation archéogéomorphologique des structures militaires et traces d'occupation du sol. Un traitement de visualisation dérivé du MNT LIDAR HD (fig. 4.31A) est superposé à une orthophotographie (fig. 4.31B), une carte topographique (fig. 4.31C) et un plan directeur des GCTA (fig. 4.31D). Cette approche permet d'identifier et de contextualiser des polémoformes (tranchées à traverses, voies ferrées étroites, cratères d'obus) en fonction des dynamiques paysagères (champs agricoles au nord, forêt au sud).

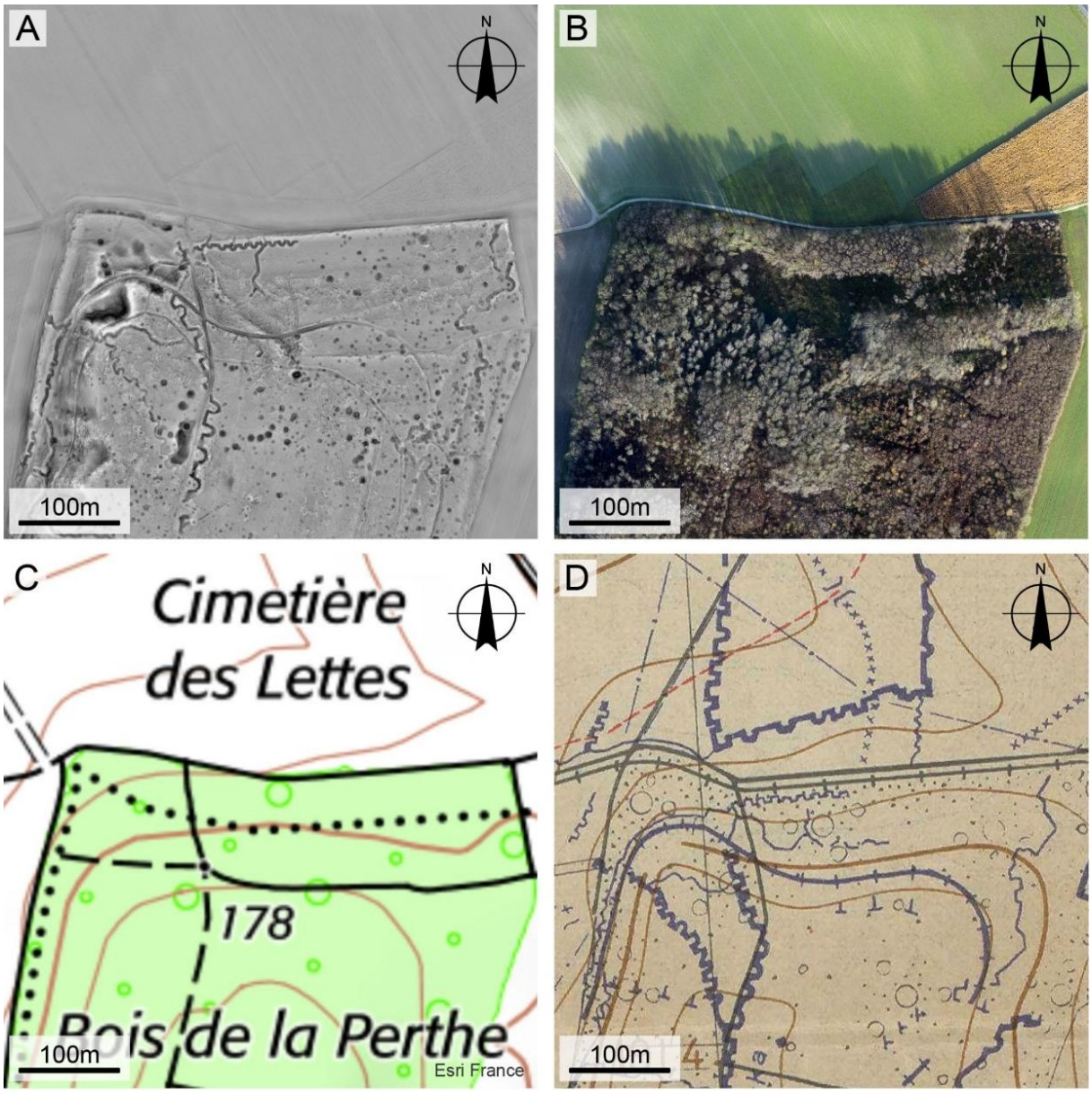


Figure 4.31 : Exemple de croisement documentaire. A : TPI dérivé du MNT LIDAR HD (2023) ; B : Orthophotographie LiDAR IMPACT 14-18 (2015) ; C : SCAN 25® IGN (2021) ; D : Plan directeur des GCTA au 1/10 000 de Reims (17 mai 1918).

4.3.3.1.1. Modalités d'accès

L'accès à certaines ressources cartographiques s'est fait en temps réel via des services en ligne fournis par des organismes publics tels que l'IGN et le BRGM (tab. 4.12). Ce mode d'intégration permet de s'affranchir du géoréférencement manuel, tout en garantissant l'utilisation de données à jour. Lorsque les cartes et plans n'étaient pas disponibles en flux, un géoréférencement a été réalisé, sous ArcGIS ou QGIS, par transformation mathématique à l'aide de documents de référence récents (*e.g.*, cartes topographiques, BD cadastrales ; fig. 4.32). Deux méthodes ont été privilégiées selon la nature des documents.

La transformation polynomiale de 1er degré est utilisée pour les documents destinés à une consultation visuelle plutôt qu'à une exploitation vectorielle précise. Elle repose sur des opérations simples : translation (décalage), rotation, mise à l'échelle. À l'issue de cette transformation, l'erreur quadratique moyenne (EQM) permet d'évaluer la précision du calage, en mesurant l'écart entre les coordonnées transformées et les coordonnées de référence. La résolution des rasters à géoréférencer ainsi que la précision géométrique des levés cartographiques influencent directement cette erreur (Berthe, 2024).

Carte ***Map***	**Échelle** ***Scale***	**Édition, lever** ***Production, survey***	**Type de flux (source)** *Stream type (source)*
Carte de Cassini	1/86400	1740 (E)	WMTS (IGN, BNF)
Carte d'État-Major	1/40 000	1825-1826 / 1831 (L)	WMS, WMTS (IGN)
Scan 50 historique	1/50 000	années 1950	WMS, WMTS (IGN)
Carte géologique	1/50 000	1975-1981	WMS (BRGM)
Scan 25 touristique	1/25 000	2021	WMS, WMTS (IGN)

Tableau 4.12 : Liste des documents cartographiques utilisés sous SIG à partir d'une carte en flux. E : Date d'édition ; L : Date de lever ; BNF : Bibliothèque nationale de France ; BRGM : Bureau de recherches géologiques et minières (Service géologique national) ; IGN : Institut National de l'information géographique et forestière ; WMS : *Web Map Service* ; WTMS : *Web Tile Map Service.*

La transformation TPS (*Thin Plate Spline*) est appliquée aux documents anciens nécessitant une correction locale des déformations. Cette méthode est particulièrement adaptée aux documents faisant état de déformations géométriques intrinsèques à la carte originale (erreur de lever, faible précision) ou au vieillissement du support (étirement, gauchissement, pliure), car elle permet une flexibilité accrue en ajustant localement la carte (Bakkouch et al., 2015). Elle exige un nombre important de points de calage, répartis de manière homogène et les points colinéaires doivent être évités, sous peine d'affecter la précision de la transformation. Contrairement à la transformation polynomiale, l'EQM, nécessairement proche de zéro, devient un indicateur peu pertinent pour évaluer la précision globale du géoréférencement car les points de contrôle sont ajustés exactement à leur position définie.

Le SCAN 25® et sa version vectorisée (BD TOPO®) ont été privilégiés comme couches de référence. Bien que leur précision soit légèrement inférieure à celle de la BD ORTHO® (écart inférieur à 2,5 m), leur choix s'appuie sur plusieurs éléments :

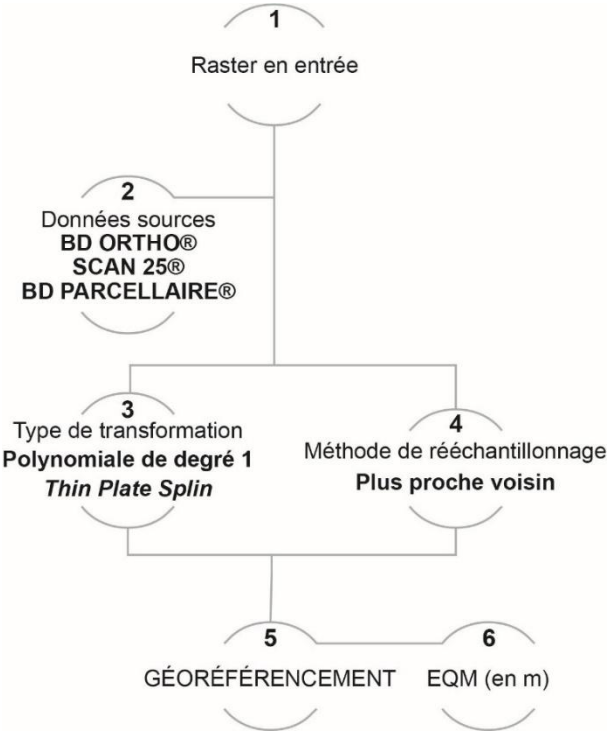


Figure 4.32 : Schéma théorique du géoréférencement d'un fichier raster (1) à partir de l'attribution de points d'amer avec des données sources (2) et de l'application d'un type de transformation spatial (3) et d'une méthode de rééchantillonnage (4). Après géoréférencement (5), l'erreur quadratique moyenne (EQM) quantifie la différence spatiale entre les coordonnées des points attribués au nouveau fichier et les coordonnées des données sources (6).

- Aucune différence significative d'EQM entre ces références n'a été relevée (Favre et al., 2017).

- Lisibilité accrue du paysage grâce aux annotations topographiques facilitant l'interprétation morphologique.

- Présence d'éléments fixes tels que les découpages administratifs, qui fournissent des points de calage fiables, notamment sur les cartes historiques comme l'Atlas de Poinsignon (fig. 4.12B) et la Carte de France du service vicinal (fig. 4.12E).

Les points de calage ont été définis en priorité sur des éléments fixes artificiels, souvent employés comme repères géodésiques par les géomètres-arpenteurs. Parmi eux, les clochers, moulins et intersections routières ont été retenus pour leur stabilité temporelle et leur précision dans les levés cartographiques. Les points fixes naturels, comme les confluences de cours d'eau, ont également été exploités, bien qu'ils nécessitent une vigilance accrue vis-à-vis des dynamiques morphologiques (*e.g.*, méandrement des rivières) qui peuvent altérer leur localisation au fil du temps.

Le rééchantillonnage a été réalisé principalement par la méthode du plus proche voisin afin de préserver l'intégrité des tracés, des symboles et des annotations cartographiques, sans introduire de valeurs interpolées susceptibles d'altérer la lecture des documents anciens[21].

La même démarche d'intégration a été appliquée de manière exhaustive aux photographies aériennes anciennes militaires (fig. 4.18-4.20) et de façon ponctuelle aux clichés de l'IGN (annexe 38).

[21] https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/data-management/resample.htm

4.3.3.1.2. Exemple de l'intégration du cadastre napoléonien

Le processus de géoréférencement est illustré ici à travers le cas du cadastre napoléonien, exploité dans le cadre de la reconstitution des usages du sol anciens à l'échelle parcellaire. Ce document est l'un des plus exigeants à intégrer dans un environnement SIG, du fait des déformations fréquentes affectant les plans d'origine, de la nécessité d'un calage spatial précis lors du géoréférencement et du travail de digitalisation indispensable à l'extraction et à l'incorporation des informations portées par les plans.

L'intégration de ces données géohistoriques, réalisée sous QGIS v3.28.12, s'appuie sur les méthodologies proposées par Franchomme (2008) et développées par Rochel (2016) et Rochel et al. (2017a), par exemple mises en œuvre dans l'étude des usages du sol du nord de l'agglomération de Nancy (Rochel et al., 2017b) et de sa ceinture nourricière (Rochel, 2022) ou du Massif du Fossard entre Remiremont et Épinal (Rochel et al., accepté).

Pour chaque commune, le géoréférencement des tableaux d'assemblage a été réalisé afin d'obtenir une vue d'ensemble du finage avant le calage des plans parcellaires (fig. 4.9A). Ces derniers ont été géoréférencés à partir de la BD Parcellaire Express (PCI) de l'IGN via la méthode de transformation *TPS* et la répartition homogène d'un nombre de points de calage assez important pour affiner les distorsions (25 à 50 par feuilles selon Rochel, 2016).

Les plans cadastraux (fig. 4.9B ; fig. 4.33A) sont ensuite digitalisés afin d'obtenir un ensemble d'entités vectorielles surfaciques (fig. 4.33B). Le caractère chronophage de cette étape (« *environ 200 parcelles par heure, hors champs à remplir, pour un opérateur chevronné ; une commune ordinaire peut être composée de plusieurs milliers de parcelles* » ; Rochel, 2016) a incité à privilégier la digitalisation des sites de construction des fortifications.

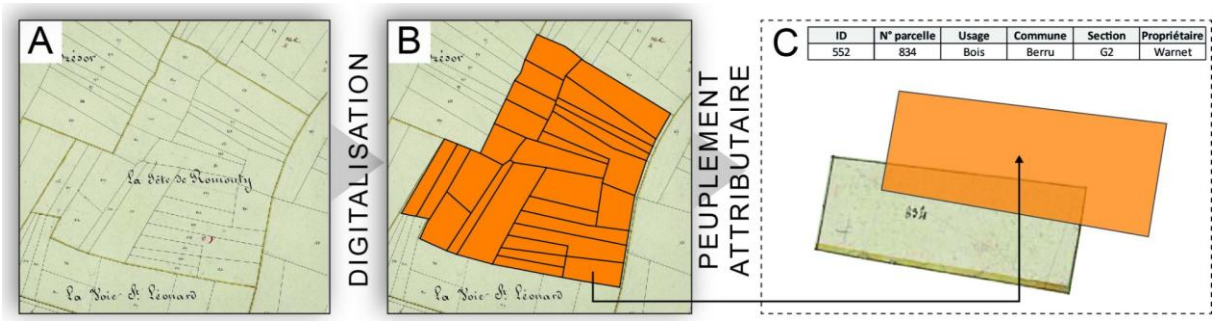


Figure 4.33 : Processus d'intégration du cadastre napoléonien au SIG. A : Plan cadastral géoréférencé (Berru G2) ; B : Parcelles digitalisées du lieu-dit de « la Tête de Romouty » ; C : Peuplement des champs de la table attributaire pour la parcelle n°834.

Pour chaque entité, le numéro de parcelle, l'usage du sol, la commune et la section sont renseignés dans la table attributaire (fig. 4.33C). Ces informations ont été extraites soit des récapitulatifs figurant en fin de section dans les états de section (fig. 4.9D) soit, lorsque l'analyse se situait à une échelle microhistorique, depuis les listes nominatives de parcelles

(fig. 4.9C). L'interprétation des types d'usages du sol s'est appuyée sur l'inventaire terminologique proposé par Franchomme (2008).

Cet exemple met en évidence les contraintes et les adaptations méthodologiques nécessaires à l'incorporation de documents historiques dans l'analyse géomorphologique et spatiale des fortifications Séré de Rivières. En définitive, l'intégration de tout document complémentaire optimise la caractérisation des anomalies topographiques, ouvrant ainsi la voie à l'enregistrement numérique des morphologies associées aux fortifications Séré de Rivières, au paysage de guerre du Pays de Reims et à son environnement archéologique.

4.3.3.2. Cartographie interprétative

La *cartographie des anomalies topographiques* (3.2) constitue une étape majeure de la suite d'opérations d'exploitation du LiDAR en archéologie (Georges-Leroy et al., 2011 ; Lozić et Štular, 2021). Elle intervient après la production des MNT et des traitements de visualisation et précède la validation sur le terrain. Cette étape a été réalisée par l'intermédiaire d'un travail de digitalisation manuel régi par un protocole, dont l'objectif est de structurer l'interprétation des données en traduisant les formes identifiées en entités SIG exploitables. Ce protocole a vocation à standardiser l'enregistrement des structures en tenant compte des choix méthodologiques qui encadrent leur individualisation, ce qui réduit l'arbitraire et la subjectivité de l'opérateur et améliorant la reproductibilité des résultats (Georges-Leroy et al., 2011 ; Opitz et Cowley, 2013).

Pour le créer, chaque type d'anomalie a été défini en fonction de ses caractéristiques morphologiques, à partir desquelles sont ensuite énoncées des normes cartographiques. Ces normes cadrent l'individualisation des entités et explicitent leur mode de cartographie. Pour faciliter leur reconnaissance, ces descriptions sémantiques sont complétées par des profils topographiques et des vues en plan. En parallèle, des données morphométriques (longueur, largeur, diamètre) et archéologiques (vérification sur le terrain, datation) ont été enregistrées dans la table attributaire, en fonction du type de vecteur choisi pour la représentation (ponctuel, linéaire, polygonal ; tab. 4.13).

Les structures cartographiées ont été organisées en trois catégories thématiques, construites à partir du paysage fortifié rémois. Les figures 4.34 à 4.37 proposent des définitions inédites des morphologies internes des fortifications Séré de Rivières de type 1874, élaborées à partir des données LiDAR, associées aux forts de première génération (*i.e.*, antérieurs à la crise de l'obus-torpille ; *cf.* partie 2.4). Ces protocoles de digitalisation s'organisent selon la typologie fonctionnelle présentée en figure 2.18A et le degré de récurrence des formes. Ils distinguent, d'une part, les formes invariables liées à la défense rapprochée (fig. 4.34) et à l'action lointaine (fig. 4.35), et d'autre part, les formes plus singulières constituant des particularismes morphologiques, également associées à ces deux registres fonctionnels

(fig. 4.36, 4.37). En raison de la jonction fréquemment diffuse du glacis, constituant un invariant morphologique de la défense rapprochée (fig. 4.34), avec la topographie environnante, sa délimitation repose sur un recoupement d'indices morphologiques, combinant l'analyse LiDAR avec l'identification de ruptures de pente et la prise en compte de la largeur basale maximale généralement admise dans les cours de fortification (*c.* 30 m ; Simoutre, 1889a). Il s'avère par ailleurs que les substructures relevant de l'intendance ne sont pas identifiables morphologiquement en surface (casernements, magasins à poudre), les massifs de terre qui les recouvrent produisant des volumes trop englobants pour permettre leur individualisation. En revanche, les traverses-abris et les caponnières classiques sont associées à des massifs de protection plus restreints et relativement standardisés, rendant possible leur discrimination morphologique au sein du MNT. La digitalisation a été réalisée sur une surface plane afin de produire des indicateurs strictement planimétriques et de limiter la sensibilité des mesures aux artefacts liés à la résolution et à l'interpolation du MNT.

La **figure 4.38**, dédiée aux polémoformes héritées de la Première Guerre mondiale, s'inspire en partie des travaux de Taborelli (2018) et De Matos-Machado (2018). Elle s'appuie également sur une réflexion menée lors d'un stage de recherche de Master 1 portant sur la forêt de Spincourt (Ancelin, 2019), qui bénéficie d'un relevé LiDAR perpendiculaire à la ligne de front, couvrant toute la profondeur des réseaux de défense allemands dans la plaine de la Woëvre (Ritz et Sztuka, 2024). À l'exception des positions d'artillerie, l'ensemble des constructions militaires concentrées dans l'espace, cartographiées ici via un vecteur ponctuel, ont été regroupées sous le vocable générique de structure.

Enfin, la dernière catégorie s'intéresse au palimpseste topographique constituant l'environnement archéologique local. Elle englobe les levées, fossés et épaulements non liés aux conflits, ainsi que les sites d'extractions (fig. 4.39).

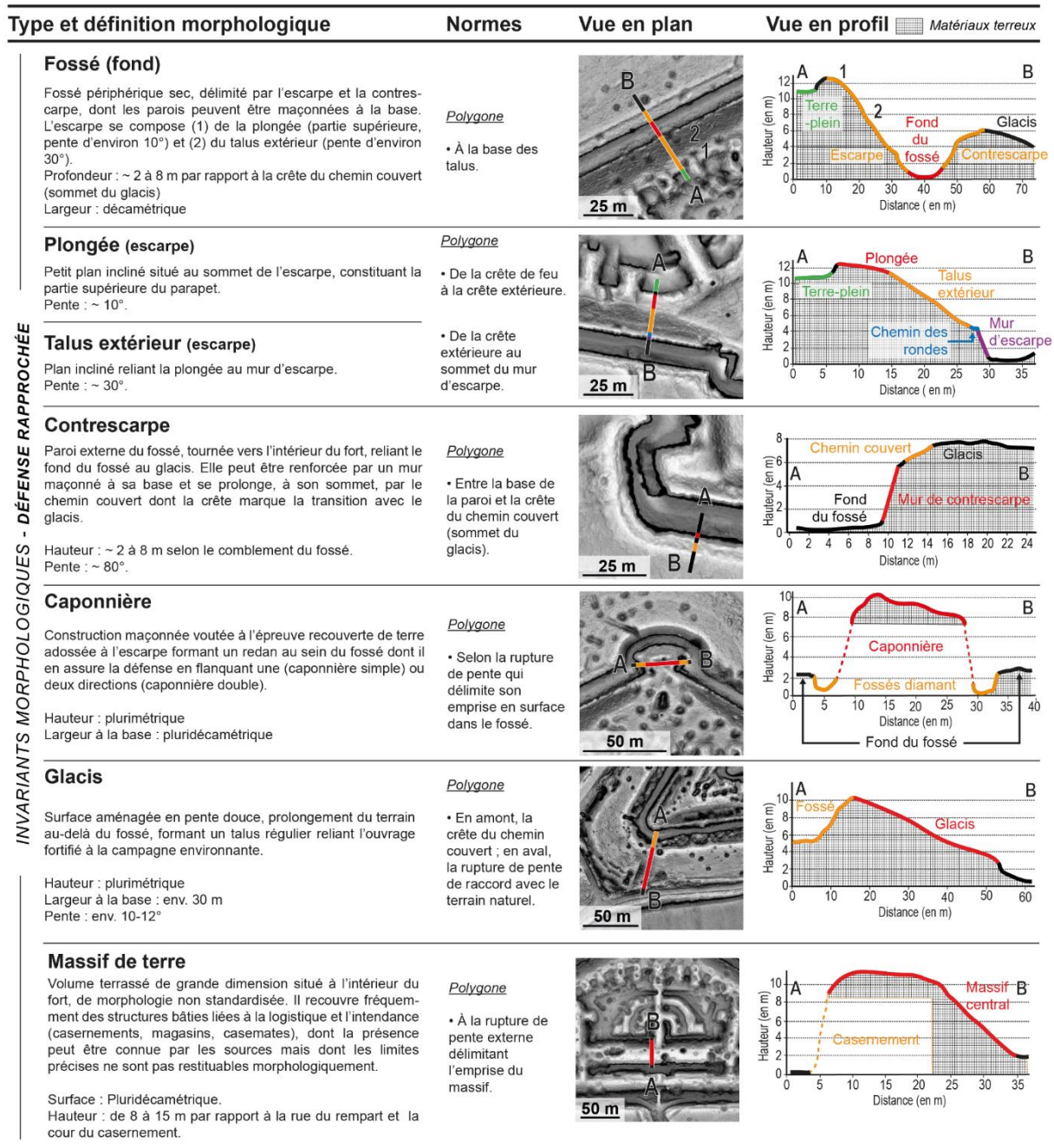


Figure 4.34 : Protocole de digitalisation des morphologies Séré de Rivières associées au fort de type 1874 relatives à la défense rapprochée et constituant des invariants morphologiques.

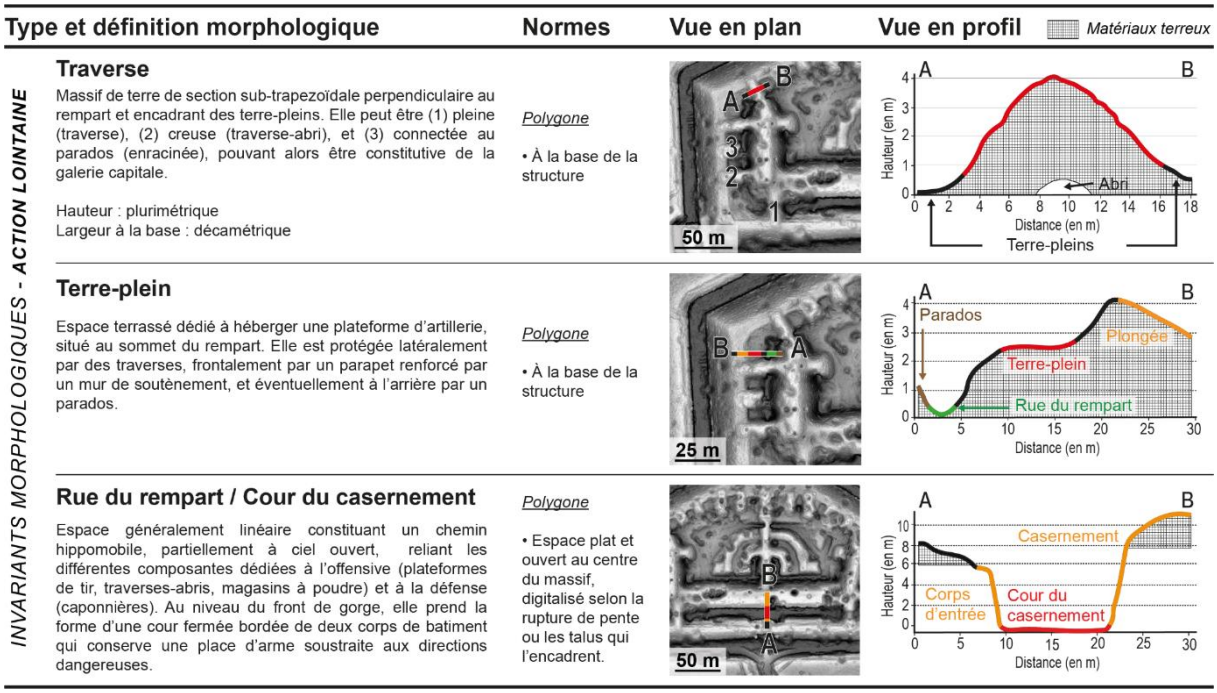


Figure 4.35 : Protocole de digitalisation des morphologies Séré de Rivières associées au fort de type 1874 relatives à l'action lointaine et constituant des invariants morphologiques.

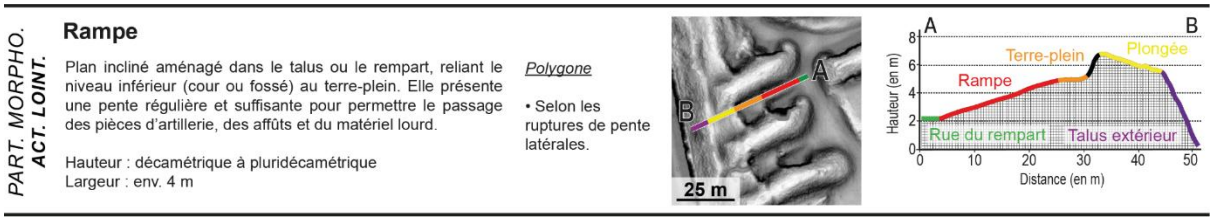


Figure 4.36 : Protocole de digitalisation des rampes constituant la seule catégorie de particularisme morphologique relative à l'action lointaine.

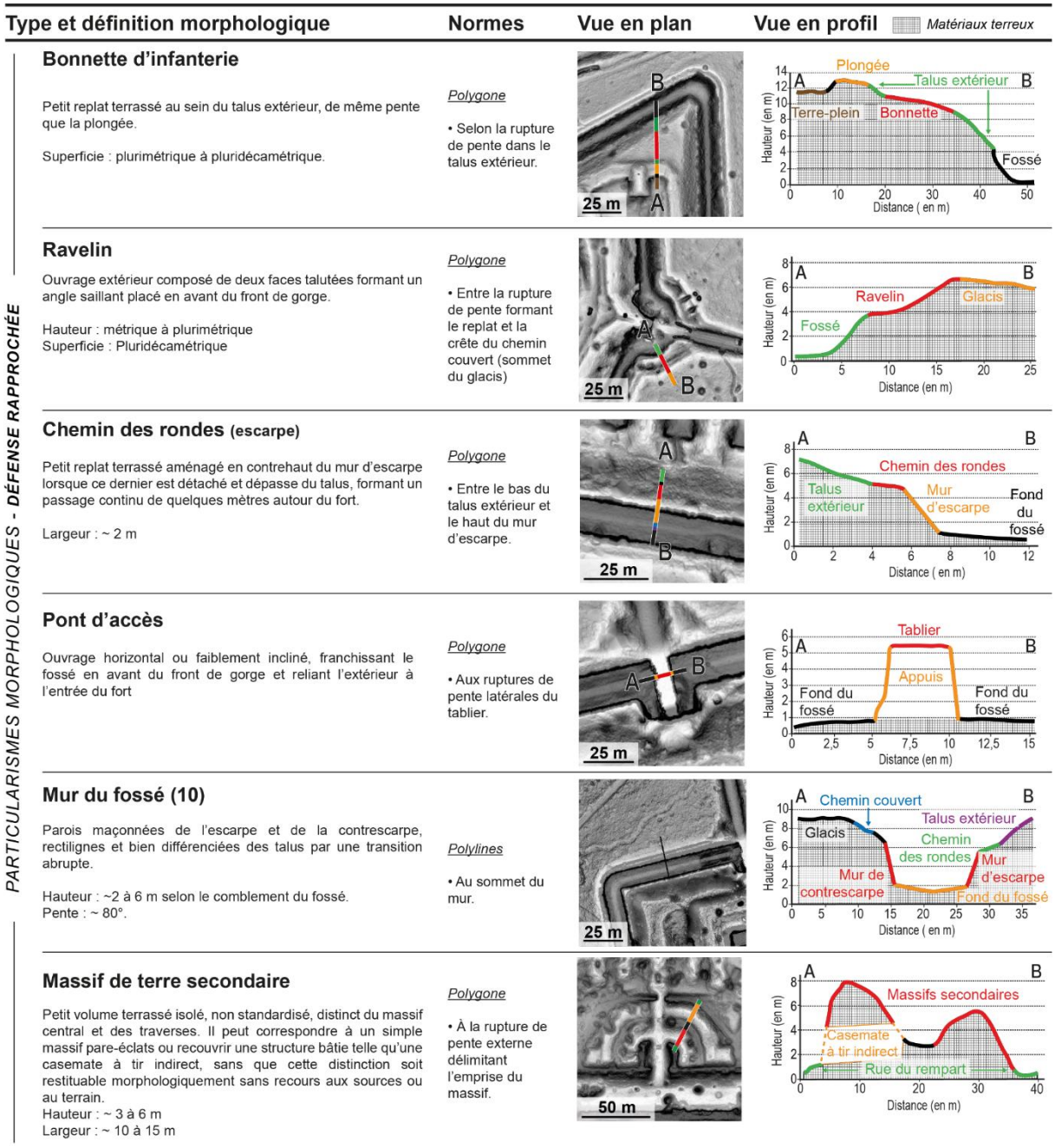


Figure 4.37 : Protocole de digitalisation des morphologies Séré de Rivières associées au fort de type 1874 relatives à la défense rapprochée et constituant des particularismes morphologiques.

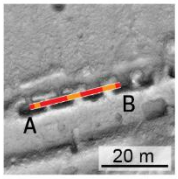
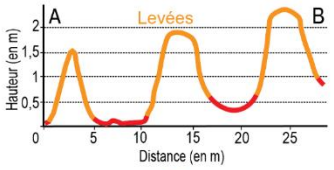
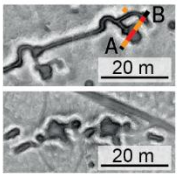
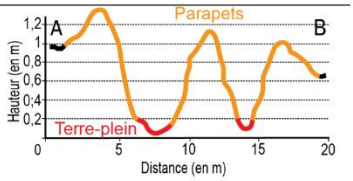
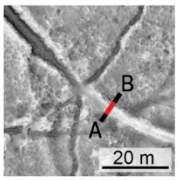
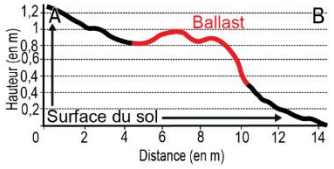
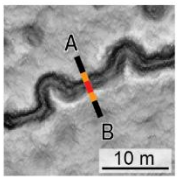
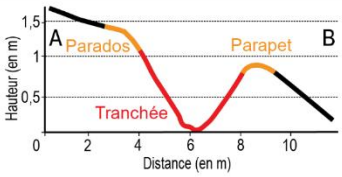
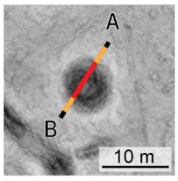
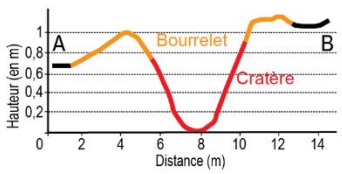
Type et définition morphologique	Normes	Vue en plan	Vue en profil
Structure Aménagement polygonal ou orthogonal matérialisé par une excavation ou des levées.	*Point* • Au centre de la structure.		
Emplacement d'artillerie Terre-plein de forme orthogonale ou polygonale, ceinturé par un parapet pare-éclats, parfois doté d'épaulements annexes et généralement disposé par groupes de quatre (batterie).	*Point* • Au centre de la structure.		
Voie ferrée Levée de terrain linéaire étroite de grande extension à faibles degrés de courbure se transformant localement en fossé. Largeur : ~ 2 à 5 m	*Polylignes* • Au centre de la structure.		
Tranchée Excavation longitudinale artificielle, au tracé généralement crélené, associé à deux levées (parapet/parados) et à fond en v. Largeur : plurimétrique Profondeur : ~ - de 1 m	*Polylignes* • Une entité à chaque jonction. • Au fond de l'excavation.		
Cratère d'obus Petite dépression fermée subcirculaire à fond hémisphérique, associé ou non à un bourrelet périphérique. Profondeur : pluridécimétrique Diamètre : ~ 2 à 10 m	*Polygone* • Au sommet du cratère. *Point* • Au centre de la structure.		

Figure 4.38 : Protocole de digitalisation des polémoformes de la Première Guerre mondiale.

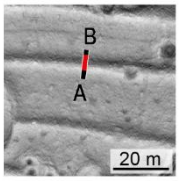
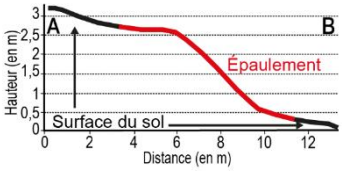
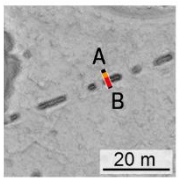
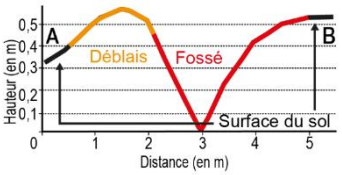
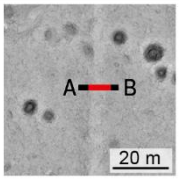
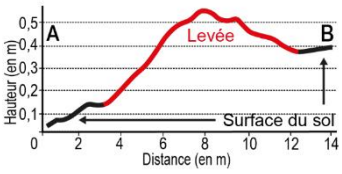
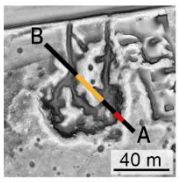
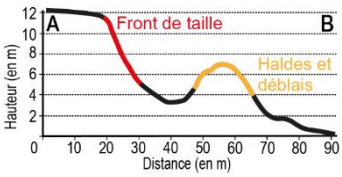
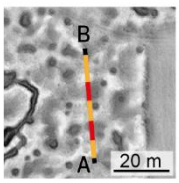
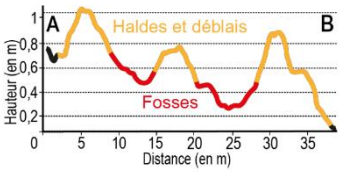
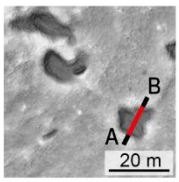
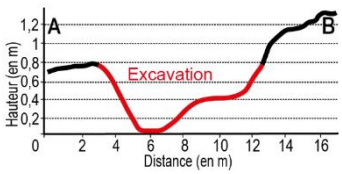
Type et définition morphologique	Normes	Vue en plan	Vue en profil
Épaulement Élévation de matériaux terreux endogènes, rectiligne et parfois courbe, et perpendiculaire à la pente, utilisée pour terrasser et parfois renforcée par un mur de soutènement. Largeur = plurimétrique Hauteur = 1 à 2 m	*Polylignes* • Une entité à chaque jonction. • Au centre au sommet du talus.		
Fossé Excavation longitudinale artificielle à fond évasé ou en V. Largeur = ~ 2 m Profondeur = pluridécimétrique	*Polylignes* • Une entité à chaque jonction. • Au fond du fossé.		
Levée Large bande de terre surelevée et rectiligne. Largeur = plurimétrique Hauteur = pluridécimétrique	*Polylignes* • Une entité à chaque jonction. • Au centre de la partie sommitale de la levée.		
Carrière à front de taille Rupture de pente brutale rectiligne ou curviligne (front d'extraction) associé à un espace escavé à fond plat, et à des accumulations artificielles de matériaux stériles disposés en dôme ou en verse (haldes et déblais). Largeur = plurimétrique Hauteur = pluridécimétrique	*Points à petite échelle* • *Au centre de la structure.* *Polygones à grande échelle* • Au sommet du front de taille et autour des éléments associés.		
Carrière en fosses d'extraction Multiples dépressions plurimétriques juxtaposées, de forme circulaire, elliptique ou irrégulière. Envergure = hectométrique Hauteur = pluridécimétrique	*Polygone* • Autour de l'ensemble de dépressions.		
Excavation Petite dépression ou concavité naturelle ou artificielle indéterminée. Envergure = décimétrique à décamétrique Hauteur = pluridécimétrique à métrique	*Point* • Autour de l'ensemble de dépressions.		

Figure 4.39 : Protocole de digitalisation des anomalies topographiques non directement affiliées à la guerre.

L'étape suivante de la suite d'opérations, la validation de terrain, vise à confronter les entités cartographiées aux observations *in situ* afin d'affiner l'interprétation.

4.3.3.3. Validation de terrain

La *validation de terrain* (3.5) permet d'évaluer la fiabilité de l'inventaire numérique en confrontant les entités cartographiées aux observations de terrain. L'inventaire numérique réalisé en amont optimise cette phase en ciblant les structures à vérifier selon leur morphologie, leur organisation spatiale et leur niveau de confiance. Cette confrontation entre SIG et terrain permet de corriger d'éventuelles erreurs d'identification et de compléter les descriptions. Elle vise à discriminer les structures anthropiques avérées des artefacts liés aux traitements LiDAR ou aux formations naturelles, et à affiner la caractérisation

morphologique des entités identifiées lors de l'étape précédente. L'ensemble s'inscrit dans un processus itératif, au cours duquel les observations de terrain contribuent à l'ajustement des classifications cartographiques et au renforcement du protocole de digitalisation (Lozić et Štular, 2021).

Vecteur	Type	Morphométrie	Archéologie	
			Vérifié	Datation
Linéaire	• Épaulement • Fossé • Levée • Tranchée • Voie ferrée	Calcul de la longueur (en m)	• Oui • Non	• Ancien • Indéterminé • Première Guerre mondiale • Récent • Séré de Rivières
Ponctuel	• Carrière • Structure • Cratère d'obus • Emplacement d'artillerie • Excavation • Plateforme de charbonnage	/	• Oui • Non	• Ancien • Indéterminé • Première Guerre mondiale • Récent • Séré de Rivières
Surfacique	• Carrière • Casernement • Caponnière • Fossé • Rue du rempart • Terre-plein • Traverse	Calcul de la surface (en m²)	• Oui • Non	• Ancien • Indéterminé • Première Guerre mondiale • Récent • Séré de Rivières

Tableau 4.13 : Table attributaire utilisée pour l'inventaire cartographique.

En plus de vérifier l'existence et la nature des anomalies cartographiées, l'objectif est également de réduire le biais inhérent à une analyse strictement numérique en intégrant une perception *in situ* des formes topographiques (De Matos-Machado, 2018). En effet, l'interprétation des MNT repose sur une visualisation verticale, qui peut accentuer ou masquer certaines caractéristiques. La reconnaissance directe des structures permet ainsi de contextualiser les signatures morphologiques, de confirmer ou d'infirmer les hypothèses initiales et donc d'affiner les critères de digitalisation.

La validation repose sur une approche ciblée optimisant le temps de prospection et assurant un échantillonnage représentatif de la variabilité des anomalies identifiées dans le SIG, en priorisant les structures à inspecter selon plusieurs critères :

- Niveau de confiance de l'interprétation initiale, basé sur l'expérience de l'opérateur et la clarté des signatures morphologiques.
- Densité des anomalies, afin de concentrer l'effort sur les zones où les structures se superposent ou s'organisent en réseaux cohérents.
- Accessibilité du terrain, qui conditionne la faisabilité des prospections.
- Pertinence scientifique, en privilégiant les sites présentant un intérêt archéologique ou historique avéré.

Les prospections s'appuient sur un matériel spécifique destiné à documenter les observations et à enrichir la base de données SIG. Elles mobilisent le SIG nomade QField dans lequel sont intégrés les MNT LiDAR, les traitements de visualisation dérivés, et les documents cartographiques actuels et anciens du secteur. Cet ensemble documentaire est utilisé comme support principal pour la localisation des structures et la vérification des interprétations. Le matériel de terrain complémentaire est composé d'un décamètre, pour mesurer les dimensions des structures, d'un appareil photo et d'une mire pour fournir une échelle lors des prises de vue photographiques. Les données collectées sur le terrain (photographies, relevés GPS, descriptions morphologiques, géologiques et pédologiques) sont ensuite intégrées au SIG afin de compléter et de réajuster l'inventaire numérique.

Le nombre de sorties nécessaires varie en fonction de la taille du secteur d'étude, de la diversité des signatures morphologiques et de l'état des connaissances préexistantes. L'étude du secteur de la ceinture fortifiée Séré de Rivières de Reims a impliqué trois campagnes de terrain menées notamment sur chacun des trois grands sous-secteurs : les buttes de Brimont, de Berru et le Massif de Saint-Thierry. Les conditions y sont globalement favorables, notamment une topographie moyennement accidentée et une dominance d'essences feuillues facilitant la lecture des MNT (fig. 3.16C, 3.18B, D-E), et une présence d'anomalies localement documentées, tels que dans le cadre de l'étude des hydrosystèmes de la Montagne de Reims (Berthe, 2024 ; Berthe et Ancelin, 2024) ou de l'étude des vestiges de l'arrière-front allemand et des combats sur la butte de Brimont (Devos et al., 2019b).

Une fois les observations de terrain intégrées et les corrections appliquées à l'inventaire numérique, l'étape suivante consiste à structurer les résultats obtenus afin d'en proposer une interprétation approfondie.

4.3.3.4. Interprétation approfondie

L'*interprétation approfondie* ou *deep interpretation* (3.4), étroitement articulée à l'inventaire cartographique sur lequel elle s'appuie, constitue un volet central de la démarche méthodologique adoptée dans cette thèse. Elle correspond à l'exploitation analytique des données validées, visant à affiner la typologie des anomalies morphologiques et à préciser leur description morphométrique. Sans vouloir présenter de manière exhaustive l'ensemble des traitements possibles à partir des inventaires LiDAR, cette section formalise les principales approches méthodologiques mobilisées pour l'étude morphologique des polémoformes Séré de Rivières, en cohérence avec les objectifs géomorphologiques de la thèse : analyse morphométrique, étude du degré d'effacement, estimation des volumes bouleversés.

4.3.3.4.1. Analyse morphométrique

Afin d'analyser la forme globale des ouvrages, le contour morphologique opérant retenu correspond à la crête du chemin couvert, située au sommet de la contrescarpe. Le glacis n'est pas intégré à cette délimitation en raison de sa transition souvent progressive avec la topographie environnante, qui rend son tracé incertain à l'échelle planimétrique, malgré sa persistance morphologique locale (fig. 2.18B, 4.34). Les emprises ont été digitalisées manuellement sous SIG, à partir des données LiDAR lorsque les structures sont encore lisibles dans le relief actuel (fig. 4.34-4.37), ou reconstituées à partir de documents d'archives lorsque les formes ont été partiellement ou totalement effacées.

À partir de ces polygones, les métriques planimétriques de base (surface, surface convexe, périmètre) ont été calculées, servant de support au calcul d'indices de forme mobilisés dans l'analyse (convexité, compacité de Gravelius, allongement de Horton). Le nombre de caponnières, issu de l'inventaire cartographique et systématiquement confronté aux sources historiques, a également été intégré comme variable fonctionnelle. Les traitements statistiques exploratoires (corrélations, ACP, CAH) ont été réalisés via le logiciel de traitement statistique R4.4.3. Ils sont utilisés comme des dispositifs d'aide à l'interprétation, permettant d'objectiver certaines régularités morphologiques et de tester la cohérence des regroupements, issus de la lecture typomorphologique subjective des formes, réalisés au préalable.

4.3.3.4.2. Estimation du degré d'effacement

Les indices de rugosité de terrain et de pente ont été calculés principalement dans le but de quantifier et d'analyser l'effacement des morphologies Séré de Rivières (**tab. 4.14**).

Population	un fort	tous les pixels dans le périmètre du fort	tous les pixels entre la crête du chemin couvert et la crête extérieure
Individu	un fort	1 pixel	1 pixel
Variable	RgI	TRI	SLOPE
Modalité	> 1	/	0 - 90

Tableau 4.14 : Description des populations statistiques étudiées dans le cadre de l'analyse de l'effacement des morphologies Séré de Rivières. RgI : Indice global de rugosité (rapport surface drapée / surface plate) ; TRI : *Terrain ruggedness index*.

i) Rugosité

Pour obtenir une valeur numérique représentative de la rugosité de terrain exprimée par l'indice de rugosité du terrain (*terrain ruggedness index*, TRI ; fig. 4.40A), des statistiques zonales ont été calculées sur QGIS 3.28.12 à partir des rasters (outil « statistiques de zone »), permettant de déterminer les moyennes arithmétiques. L'analyse de la rugosité a été enrichie par la création d'un indice global à l'échelle du fort (RgI), proportionnel à la rugosité du

relief, défini comme le rapport entre la surface drapée et la surface plane de l'emprise de chaque fort (fig. 4.40B). Pour calculer cet indice, une couche TIN (*Triangulated Irregular Network*) a été générée à partir du nuage de points via l'outil « Jeu de données LAS vers TIN » d'ArcGIS 10.3. Cette couche vectorielle, représentant les aspérités du relief sous forme de triangles, intègre dans sa table attributaire les aires des triangles, utilisés pour calculer la surface drapée.

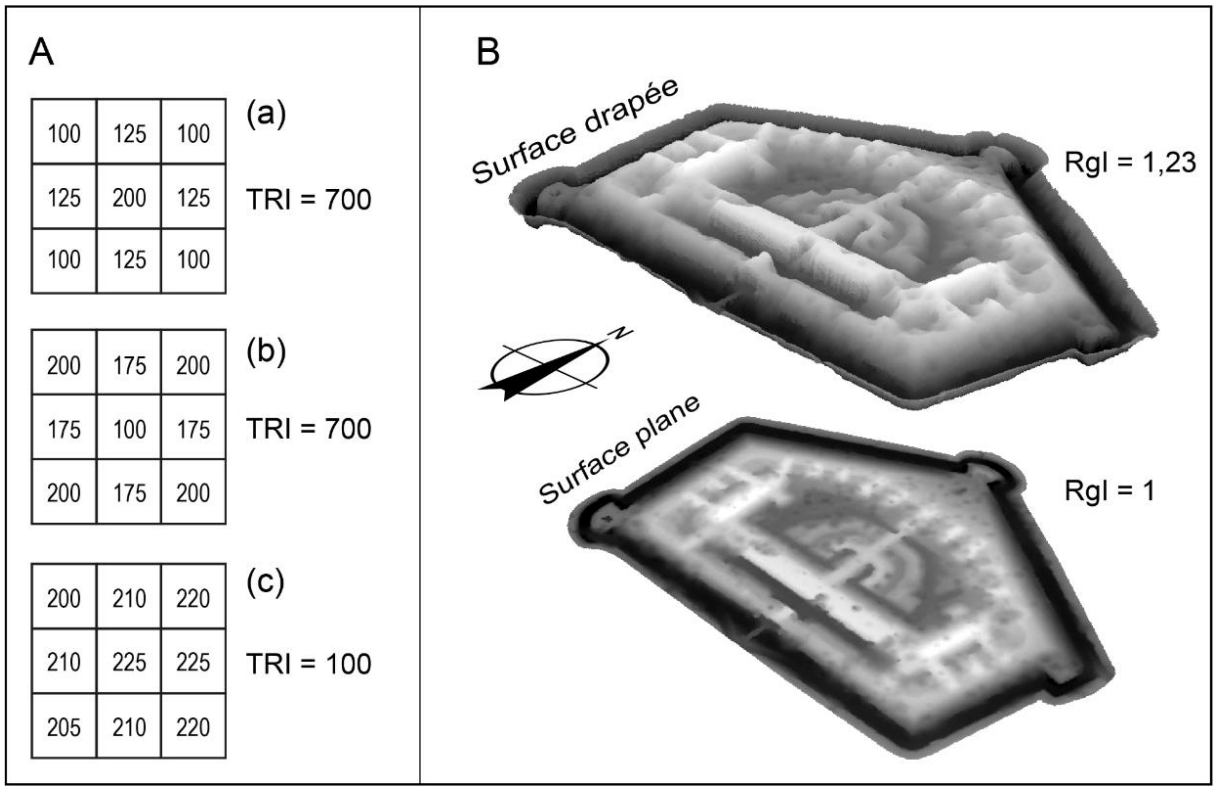


Figure 4.40 : Figures théoriques des indices de rugosité utilisés dans l'étude de l'hétérogénéité du terrain des morphologies Séré de Rivières. A : Valeurs du TRI associées à des MNT hypothétiques ; B : MNT du fort de Brimont avec et sans la représentation du relief. a : situation de sommet ; b : situation de dépression ; c : situation d'un terrain peu accidenté (Riley et al., 1999).

ii) Pente

L'analyse de l'indice de pente repose sur l'hypothèse selon laquelle la standardisation, caractéristique des fortifications Séré de Rivières (Ancelin et al., 2023), est maximale au niveau du fossé, comme l'illustre la figure 4.41A-B. À l'inverse, la complexité morphologique semble s'accroître de la périphérie vers le centre, où se situe le massif central et les structures relatives à l'intendance (fig. 2.18A).

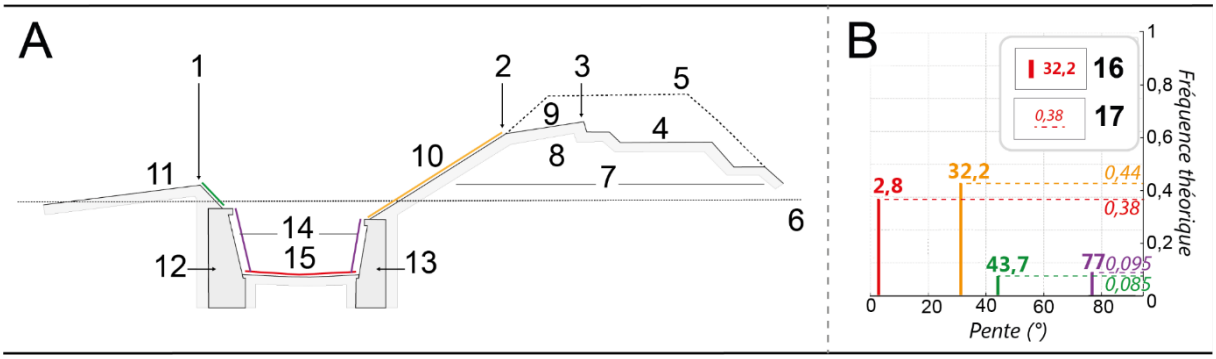


Figure 4.41 : Caractéristiques théoriques du rempart et du fossé d'un fort de type 1874 (d'après Guillot, 1949). A : Profil théorique ; B : Diagramme de distribution des valeurs des valeurs de pente théoriques du fossé. 1 : Crête du chemin couvert ; 2 : Crête extérieure ; 3 : Crête de feu (crête intérieure) ; 4 : Terre-plein ; 5 : Emplacement théorique d'une traverse-abri ; 6 : Sol naturel ; 7 : Rempart ; 8 : Parapet ; 9 : Plongée ; 10 : Talus extérieur ; 11 : Glacis ; 12 : Mur de contrescarpe ; 13 : Mur d'escarpe ; 14 : Fossé ; 15 : Cunette ; 16 : Valeur de pente ; 17 : Fréquence associée.

Pour tester cette hypothèse, les distributions statistiques des valeurs de pente de la zone périphérique de chaque fort, comprise entre la crête du chemin couvert et la crête extérieure, ont été comparées à une distribution théorique issue d'un cours de fortification militaire (fig. 4.41B). Cette distribution théorique a été établie en calculant les pentes de chaque tronçon développé à l'aide du logiciel de traitement d'image *ImageJ* et en les rapportant à la longueur planimétrique. La plongée a été exclue de l'analyse en raison de la fréquence élevée des traverses-abris qui l'interrompent (fig. 4.41A ; 2.18A-B). Cette approche a permis d'identifier quatre valeurs de pente associées à des éléments spécifiques (fig. 4.41A-B) : (i) le fond du fossé (2,8°), (ii) le talus extérieur (32,2°), (iii) le talus entre la crête du chemin couvert et le sommet du mur de contrescarpe (43,7°) et (iv) les murs du fossé (77°).

Pour obtenir la distribution réelle pour chaque fort, cette zone périphérique a été extraite du MNT à l'aide d'une couche vectorielle polygonale (fig. 4.42). Après calcul de l'indice de pente, les valeurs ont été exportées vers un tableur pour une analyse statistique des trois mesures centrales : la moyenne arithmétique, la médiane et les modes. L'attention a été portée sur les modes des distributions statistiques, représentés sous forme d'histogrammes. Ces modes ont été analysés en termes de valeur et d'amplitude et comparés aux fréquences relatives et aux pentes de la distribution théorique afin d'identifier d'éventuelles anomalies.

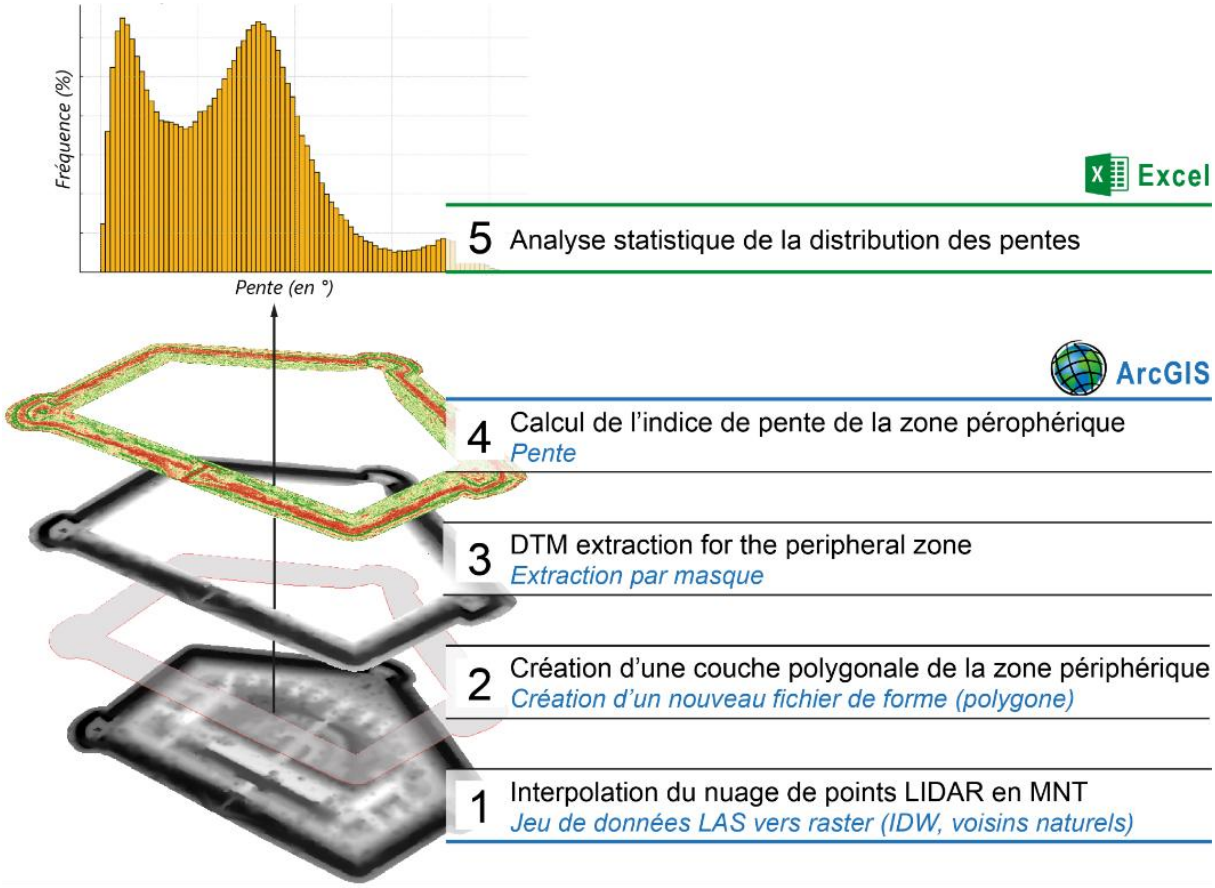


Figure 4.42 : Processus de production des distributions des valeurs de pente. 1 : MNT original découpé au niveau de la crête du chemin couvert ; 2 : Couche polygonale vectorielle couvrant la zone située entre les crêtes du chemin couvert et extérieure ; 3 : MNT (1) découpé à partir de la couche vectorielle (2) de masque ; 4 : Indice de pente du MNT découpé (3) ; 5 : Distribution statistique des valeurs de pente extraites du raster de pente (4).

iii) Taux d'effacement des polémoformes de la Première Guerre mondiale

En l'occurrence, la même logique de comparaison avec des documents d'archives a été appliquée pour estimer le taux d'effacement des réseaux de tranchées et de boyaux en croisant les plans militaires contemporains avec les données LiDAR (De Matos-Machado, 2018). La BD Tranchées créée par Taborelli (2018), produite à partir des plans directeurs au 1/20 000 du programme IMPACT 14-18, a servi de référence. La comparaison a été menée secteur par secteur, selon les emprises définies pour les inventaires, afin de documenter l'effacement sous couvert forestier et, par contraste, celui observé en milieux agricoles et urbains. Le linéaire de la BD, digitalisé de manière simplifiée (traverses et créneaux exclus), a été associé aux indices de sinuosité issus des archives militaires établis à 1,1 pour les boyaux et 1,36 pour les tranchées d'attaque (Ministère de la Guerre, 1917 ; Devos et al., 2015).

4.3.3.4.3. Estimation des volumes remblayés

Une analyse volumétrique a été conduite afin d'estimer le volume de matériaux déplacés lors de la construction *ex nihilo* des forts de la ceinture de Reims (*cf.* parties 3.2.3.2 et 3.2.3.3). La mesure des volumes bouleversés constitue un indicateur majeur de l'impact environnemental des conflits, mais son calcul reste délicat pour les fortifications permanentes. Les volumes déblayés du fossé périphérique peuvent être estimés grâce à la connaissance de sa profondeur par rapport au sol originel, bien documentée par les cours de fortification (fig. 4.41A ; Simoutre, 1889a, 1889b ; Guillot, 1949). En revanche, l'évaluation des structures souterraines, invisibles au LiDAR, dépend de rares plans de masse et d'élévation (*e.g.*, magasin-caverne du fort de Nogent-l'Abbesse ; aquarelles du fort de Brimont, fig. 4.1), de mesures manuelles chronophages ou de capteurs plus coûteux (LiDAR topographique, photogrammétrie ; *cf.* partie 4.4.1). Quant aux matériaux remblayés, leur estimation reste conditionnée par la reconstitution du relief initial, que les cartes du XIXe siècle ne permettent généralement pas de modéliser. Cela s'explique par une précision insuffisante et un changement de référentiel altitudinal du nivellement général de la France (NGF), qui a évolué à plusieurs reprises depuis la construction des forts (réseaux Bourdaloue, Lallemand et IGN 1969 ; fig. 4.43A-D).

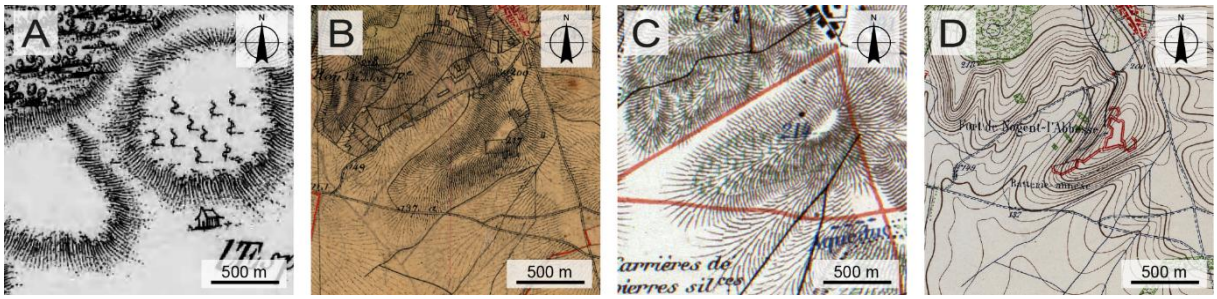


Figure 4.43 : Extraits de documents cartographiques et planimétriques représentant la topographie anté-construction du fort de Nogent-l'Abbesse. A : Feuille de Rheims de la carte de Cassini (levée en 1740 ; 1/86 400 ; Remonter le temps, IGN) ; B : Feuille Reims SE de la carte d'État-Major (levée en 1825-1826 et 1831 ; 1/40 000 ; Remonter le temps, IGN) ; C : Feuille de Beine de l'atlas de Poinsignon (éditée en 1874 ; BNF) ; D : Plan des environs de Reims du Génie (levé en 1877 ; 1/20 000 ; SHD, GR 1 V H 2141).

Pour tenter de reconstituer un modèle topographique plausible de la topographie initiale, une méthode en cinq étapes a été réalisée sur SIG sur chaque ouvrage fortifié encore lisible morphologiquement (réduit de Chenay, batterie de Berru, forts de Saint-Thierry, Brimont, Nogent-l'Abbesse, la Pompelle et Montbré ; fig. 4.44) :

- (1) Un MNT est d'abord produit par interpolation du nuage de points brut (*cf.* partie 4.3.2.2).

- (2) Un quadrillage d'entités ponctuelles est ensuite généré.

- (3) L'emprise supposée impactée par la construction du fort (enveloppe du fort et glacis périphérique ; fig. 2.18A-B) est délimitée sous forme de polygone.

- (4.1) Le MNT est découpé à l'intérieur de cette emprise.

- (4.2) Des valeurs d'altitude sont attribuées au quadrillage ponctuel par l'extraction depuis le MNT initial.

- (4.3) Un certain nombre de points supplémentaires sont saisis manuellement pour combler le vide et des altitudes théoriques sont définies.

- (5) À partir de ce jeu de points enrichi, un nouveau MNT est interpolé par l'intermédiaire de la méthode d'interpolation des voisins naturels, représentant la topographie supposée avant les terrassements.

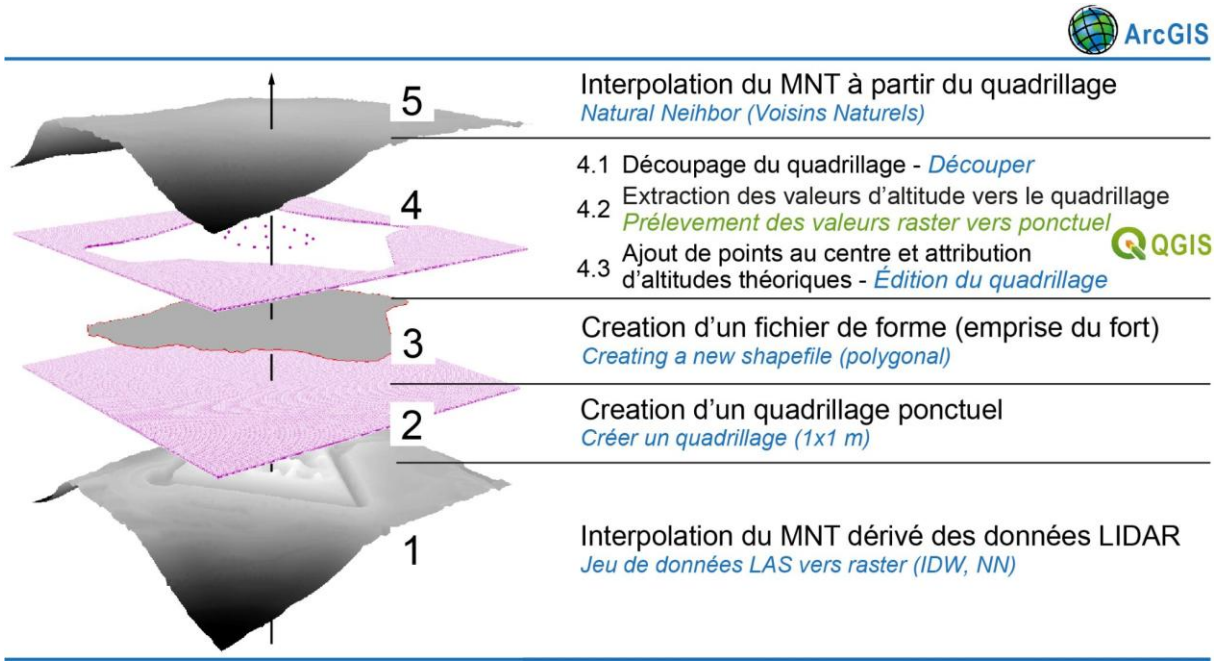


Figure 4.44 : Processus de reconstitution de la topographie initiale sous SIG.

Il est à noter que les étapes 4.3 et 5 sont réalisées de manière empirique afin de restituer un relief naturel plausible en cohérence avec un certain nombre d'indices observés relatifs à des paramètres géomorphologiques, géologiques, topographiques et historiques (tab. 4.15). Les résultats obtenus doivent ainsi être interprétés avec prudence car ils sont fortement conditionnés par les paramètres utilisés (type d'interpolation choisi, altitudes attribuées et positionnement des points de contrôle).

Indice observé	Indication possible	Application pratique dans la reconstitution
Continuité des pentes (profils convexes/concaves sans cassures nettes)	Relief non terrassé, évolution naturelle des versants	Ajuster les points pour obtenir des profils réguliers ; éviter les ruptures rectilignes ou anguleuses
Topographie périphérique	Cotes d'appui pour prolonger les formes naturelles	Utiliser les altitudes extérieures comme points de référence pour interpoler la topographie interne
Contexte géologique (substrat, pendage, altimétrie régionale)	Pentes et amplitudes plausibles imposées par le matériau	Caler les valeurs sur celles des secteurs analogues en dehors de l'emprise ; respecter les pentes maximales typiques du substrat
Absence de morphologie anthropique (rectilignes, symétries, angles vifs)	Terrassement artificiel probable	Éviter d'introduire ces formes dans le modèle ; lisser les ruptures suspectes
Archives cartographiques et planimétriques	Données directes ou indirectes sur l'état préexistant	Relativiser le modèle interpolé par rapports aux indications hypsométriques
Indices statistiques (distribution des pentes, rugosité)	Comparaison objective avec un secteur « témoin » non aménagé	Vérifier que le relief reconstitué présente des valeurs similaires à celles d'un secteur naturel équivalent

Tableau 4.15 : Critères de reconnaissance d'un relief naturel plausible pour la reconstitution topographique.

L'estimation du volume déplacé a été réalisée via l'outil « Remblais déblais » de ArcGIS 10.3, en comparant le MNT théorique (topographie naturelle ; fig. 4.45A) et le MNT actuel (topographie observée ; fig. 4.45B). Cette opération produit un raster localisant les gains et pertes volumétriques dont la table attributaire fournit directement les valeurs de volume calculées (fig. 4.45C).

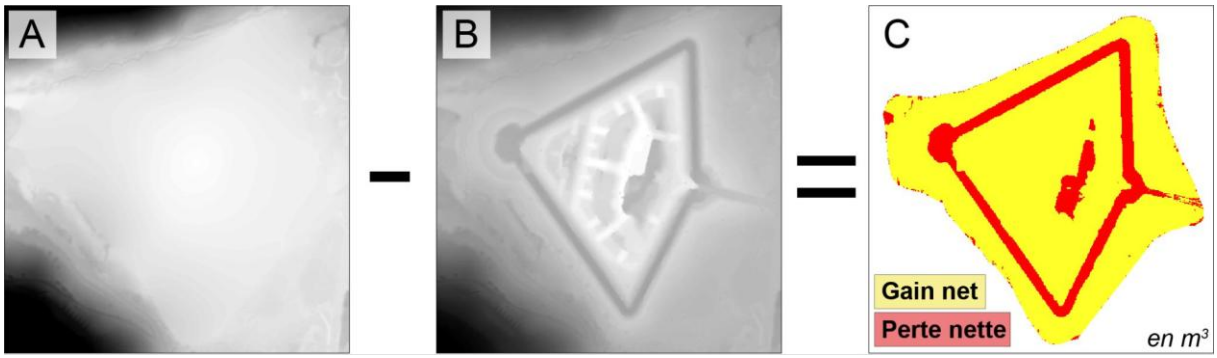


Figure 4.45 : Fonctionnement de l'outil « Remblais déblais » sur ArcGIS 10.3. A : MNT de la topographie initiale théorique ; B : MNT dérivé des données LIDAR HD ; C : Raster en sortie produit par la soustraction des deux MNT, auquel est associée une table attributaire présentant les volumes concernés.

Une correction a été appliquée aux volumes estimés afin de tenir compte du volume des vides correspondant aux substructures. Celui-ci a été calculé à partir des mesures des pièces souterraines relevées sur le plan aquarellé du fort de Brimont, à partir des cotes altimétriques tridimensionnelles (fig. 4.1). Sur cette base, la correction a été déterminée à 25 000 m³ pour les gros forts (Saint-Thierry, Brimont, Nogent), 20 000 m³ pour Montbré, 10 000 m³ pour Chenay et la Pompelle et aucune pour Berru dont les substructures ont été démantelées. En dernier lieu, ces résultats ont été extrapolés à l'ensemble des ouvrages de la ceinture fortifiée en fonction de leur envergure d'origine.

Pour l'interprétation des résultats, il est considéré que le volume total bouleversé correspond au gain net, c'est-à-dire à la somme des matériaux endogènes déblayés *in situ* (perte nette, supposés réemployés sur place selon le principe d'économie des ressources) et des apports exogènes (matériaux amenés depuis un autre site, attenant ou régional ; *cf.* partie 4.4.1.3). Les apports exogènes sont ainsi estimés indirectement par le rapport entre le gain net et le bilan net (gain net - perte nette). En revanche, les matériaux simplement remaniés *in situ*, bien qu'ils constituent des volumes bouleversés, ne peuvent pas être identifiés par cette méthode.

4.3.3.5. Cartographie automatique

Depuis une vingtaine d'années en France, l'exploitation du LiDAR en archéologie repose majoritairement sur la réalisation d'inventaires cartographiques manuels (*cf.* partie 1.3). En parallèle, des méthodes de *cartographie automatique et semi-automatique* (3.3) se sont développées (*e.g.* ; Sevara et al., 2016 ; Toumazet et al., 2017) notamment pour l'inventaire de polémoformes de la Première Guerre mondiale, comme sur le champ de bataille de Verdun (De Matos-Machado et al., 2019). Dans le secteur rémois, ces approches ont été appliquées à l'étude de l'exokarst de la Montagne de Reims (Berthe et al., 2021) et, plus ponctuellement, à la détection semi-automatique des polémoformes sur la butte de Brimont (Devos et al., 2019b).

Dans cette thèse, la cartographie automatique n'a pas été retenue, non par opposition de principe à ces méthodes, mais en raison des choix méthodologiques opérés au regard de l'objet étudié et des objectifs poursuivis. L'analyse des morphologies Séré de Rivières repose sur une approche manuelle et interprétative, visant à articuler étroitement les données LiDAR avec les observations de terrain et les sources historiques, dans un contexte où l'acquisition et le traitement des données numériques introduisent déjà une première médiation du paysage réel. Le recours à des procédures automatisées, y compris fondées sur des approches récentes d'apprentissage automatique, aurait nécessité la constitution d'un jeu d'entraînement robuste et homogène, ainsi qu'une formalisation préalable des formes de référence, jugées difficilement compatibles, en l'état actuel, avec l'hétérogénéité morphologique des ouvrages et la variabilité de leurs trajectoires de conservation à l'échelle du corpus. Ces méthodes ouvrent des perspectives prometteuses pour l'analyse des paysages archéologiques (Lozić et Štular, 2021), et plus particulièrement ceux relatifs aux fortifications Séré de Rivières (Ancelin et al., 2024), mais relèvent d'un cadre de recherche distinct de celui privilégié ici.

Ce positionnement s'inscrit plus largement dans une réflexion sur l'évolution des pratiques scientifiques contemporaines, marquées par une accélération des chaînes de traitement et une valorisation croissante de la performance technologique (Musslick et al., 2024). Ces

dynamiques, largement soutenues par la révolution numérique et par des logiques institutionnelles de rendement et d'évaluation quantitative, tendent à privilégier la rapidité, la standardisation et l'optimisation des flux de production scientifique, parfois au détriment du temps long nécessaire à l'interprétation, à l'analyse, à la vérification et à la diffusion scientifique (Candau, 2023). Le positionnement adopté ici rejoint, de manière mesurée, les principes de la *slow science*, entendue non comme un refus des outils numériques ou de l'innovation technique, mais comme une invitation à réinterroger le rythme de la recherche et la pertinence des choix méthodologiques, dont le degré d'automatisation, au regard des objets étudiés et des finalités scientifiques (Candau, 2023). Dans ce cadre, le recours à une digitalisation manuelle experte, l'exploitation de photographies aériennes obliques et la réalisation de relevés de terrain en botanique et en géologie permettent de maintenir une lecture contextualisée du paysage fortifié de la ceinture Séré de Rivières de Reims, de préserver une capacité d'interprétation critique des données et de réaffirmer le rôle central de l'expérience de terrain dans l'analyse des paysages anthropisés.

4.4. Études de terrain (diagnostic environnemental)

L'étude des polémoformes Séré de Rivières mobilise une documentation variée (archives manuscrites, photographies, cartes anciennes), intégrée et croisée dans un environnement SIG, dont l'exploitation des données LiDAR constitue le socle analytique principal. Cette sous-partie clôt la section méthodologique en présentant les investigations de terrain réalisées afin de compléter la lecture issue des modèles numériques par une observation directe des structures et de leur environnement. L'objectif est de maintenir un lien opérationnel avec la matérialité des ouvrages et leur inscription paysagère, en appui des analyses morphologiques conduites sous SIG (Georges-Leroy et al., 2011 ; De Matos-Machado, 2018 ; Lozić et Štular, 2021).

Cette approche de terrain privilégie l'observation directe des structures bâties et de leur environnement, au-delà de la seule expression topographique des fortifications. Deux volets complémentaires sont développés : l'analyse des géomatériaux, afin de documenter la nature des matériaux constitutifs des polémoformes Séré de Rivières, et l'étude de la végétation, qui permet d'appréhender les trajectoires écologiques associées aux formes militaires.

4.4.1. Étude des géomatériaux

L'étude des géomatériaux complète l'analyse des polémoformes Séré de Rivières en documentant leur dimension structurelle, étroitement liée à la morphologie aujourd'hui lisible en surface. Elle permet d'aborder les fortifications, de manière plus conventionnelle, comme des assemblages matériels dont la composition et la dégradation influencent directement les formes topographiques observées.

L'approche retenue repose sur la caractérisation *in situ* de la nature des géomatériaux employés et de leurs modalités d'usage. Elle autorise, par extension, d'interroger différentes étapes de leur cycle de vie, depuis l'extraction jusqu'au réemploi ou à l'abandon, afin d'envisager les impacts géomorphologiques potentiellement associés à ces phases (fig. 4.46). Le raisonnement méthodologique s'inscrit ainsi dans un cheminement allant de l'ouvrage vers les sites d'approvisionnement, et non l'inverse, afin de partir des formes bâties et de leur état de conservation pour remonter vers les logiques d'extraction et de mise en œuvre, conformément à une approche déjà éprouvée en géoarchéologie du bâti (Chauris, 2009).

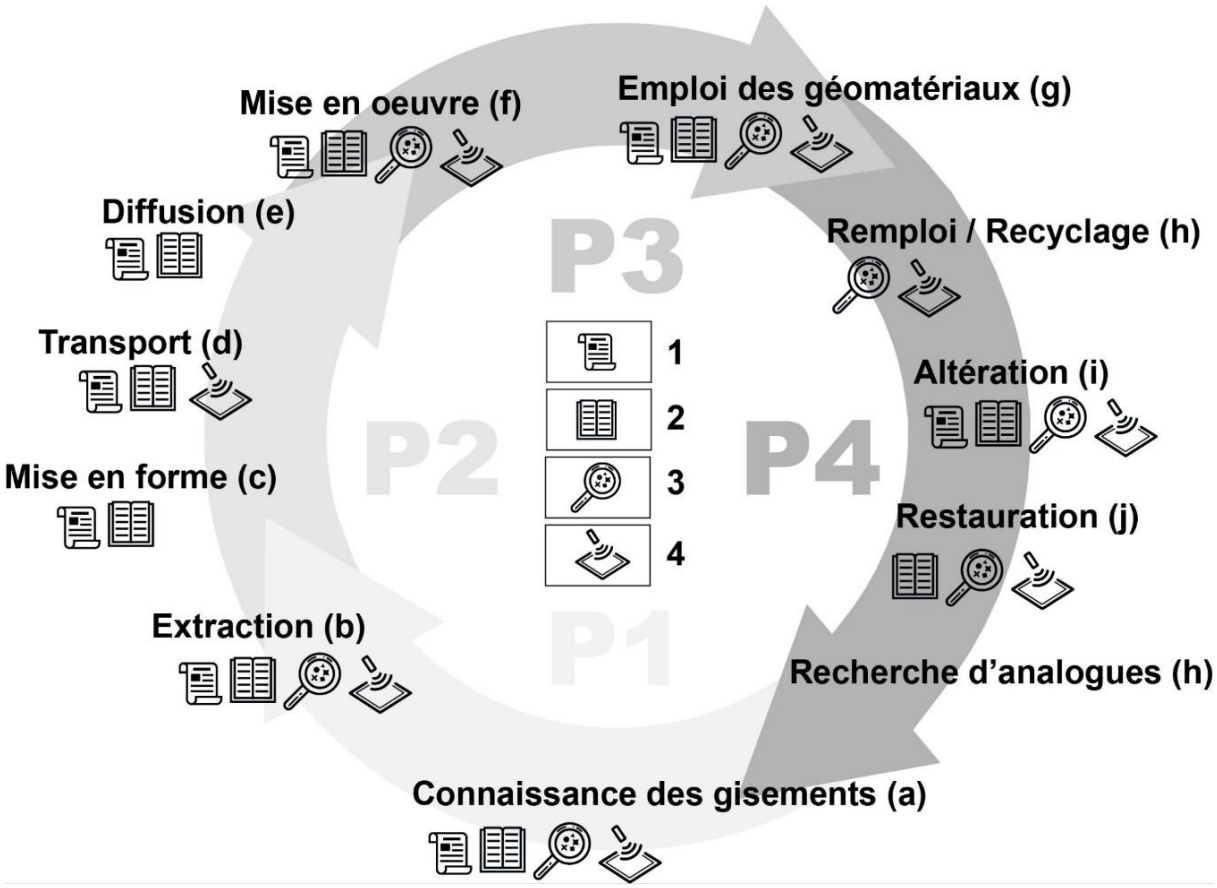


Figure 4.46 : Le cycle des géomatériaux du bâti (d'après Fronteau et al., 2019). 1 : Investigation archivistique ; 2 : Investigation bibliographique ; 3 : Investigations de terrain ; 4 : Modélisation numérique. P1 : Recherche et approvisionnement en géomatériaux ; P2 : Transport et diffusion ; P3 : Mise en œuvre et utilisation ; P4 : Réutilisation et gestion de la fin de cycle.

La partie s'organise en trois temps. Elle précise d'abord le concept de géomatériaux et le champ d'étude retenu, en s'appuyant sur les travaux développés au sein du GEGENA depuis le début des années 2000 (4.1.1.1). Elle présente ensuite les protocoles méthodologiques mis en œuvre pour l'analyse des géomatériaux *stricto sensu*, visant à documenter la composition géologique des morphologies Séré de Rivières et leurs modalités de mise en œuvre (4.1.1.2). Elle aborde enfin la recherche de traces géomorphologiques associées au cycle de vie des matériaux, impliquant l'étude des stratégies d'approvisionnement, des sites d'extraction et des infrastructures connexes (4.1.1.3). En dernier lieu, la méthode employée pour la réalisation d'une acquisition LiDAR terrestre exploratoire sur un ouvrage fortifié est présentée.

4.4.1.1. Géomatériaux : définition et problématique

L'étude des géomatériaux s'inscrit dans la continuité des approches développées au sein du GEGENA sous l'impulsion de Gilles Fronteau depuis plus de vingt ans (Fronteau, 2000 ; Fronteau et al., 2008, 2010, 2014, 2019, 2022). Cette démarche, progressivement formalisée, a notamment été synthétisée dans la publication « *Approche pluri-disciplinaire des matériaux*

du bâti à Reims (Marne) : méthodologie d'étude des pierres et des sites carriers » (Fronteau et al., 2019). Plus récemment, elle a bénéficié d'un renouvellement méthodologique sur l'aspect de la modélisation spatiale SIG abordée par la thèse de Turmel (2014), dans le cadre de la thèse de Laratte (2022) consacrée à l'emploi antique des géomatériaux dans la région rémoise.

Dans ce cadre, les géomatériaux peuvent être définis comme des *« produits de l'extraction de matériel d'origine géologique ayant subi un traitement plus ou moins important en vue d'obtenir un matériau pour la construction* » (Parriaux et Arnould, 2009), ou plus généralement comme « *l'ensemble des matières premières minérales d'origine naturelle nécessaire à la fabrication des objets de la vie quotidienne* » (Laratte, 2022b). L'analyse est ici volontairement restreinte aux matériaux employés pour la construction des fortifications, en lien direct avec les caractéristiques morphologiques et géomorphologiques des polémoformes Séré de Rivières de Reims (matériaux de construction ou géomatériaux du bâti). Les catégories relatives aux objets mobiliers ainsi qu'aux usages agricoles ou industriels ne sont pas prises en compte, bien qu'elles aient également été mobilisées par les militaires (tab. 4.16).

Catégories de Matériaux		Dénominations principales	Autres termes
Matériaux de construction	Matériaux cohérents	Pierres de taille	Pierres sculptées architectoniques, Modénatures
		Moellons	Pierres brutes ramassées en surface, Pierres tendres pour usage sous abri
		Matériaux de couverture	Ardoises, Lauzes, Pierres tégulaires
		Blocs bruts de grandes dimensions	Enrochements, Mégalithes
		Pierres ornementales	Marbres, Pierre décoratives.
		Pierres à pavés	Grès à pavés, Dallages
		Pierres de seuils et marches	
	Matériaux meubles	Graviers et Sables à mortiers	Graviers, Grèves, Graveluches
		Terres à briques ou à tuiles	Limons et argiles
		Terres à adobes (carreaux de terres crues)	
		Pierres à chaux	
		Briques de sables	Briques réfractaires en sables
Matériaux pour objets mobiliers	Statuaire	Statuaires et décors non architectoniques	Pierres marbrières, Marbres, Albatres, etc.
	Outillage lithique	Silex, Pierres meulières (meules à bras), Pierres à aiguiser, Mortiers, Pierres ollaires, Roches vertes, Autres outils en pierre	
	Pierres funéraires et religieuses	Pierres à sarcophages, Pierres tombales, Fonds Baptismaux, Bénitiers	
	Pierres pour petits objets	Palettes à fard, Jeux et jouets, Autres objets	
	Argiles à céramiques		
Matériaux pour usages industriels et agricoles	Pierres	Poids et pesons	Lests et poids, Pesons
		Castines	
		Meules	Meules hydrauliques, meules à écraser, à tan, etc.
		Abreuvoirs	Auges
		Matériaux pour empierrements de voiries	
	Matériaux meubles	Matériaux pour amendement des sols	Marnes, Cendres, Tourbes
		Matériaux pour empierrements de voiries	Graviers
		Moules à fonderie	Sables à moules de fonderie
		Pigments	Ocres
	Minerais	Minerais de fer	
		Métaux précieux	
		Autres minerais	
	Autres	Matériaux énergétiques	Tourbes, Charbons

Tableau 4.16 : Liste simplifiée des géomatériaux classés par types d'emplois (Fronteau et al., 2019).

Les matériaux de construction étudiés se répartissent en deux grandes catégories selon leur degré de cohésion (tab. 4.16). Les matériaux cohérents regroupent les éléments lithiques individualisés assemblés par maçonnerie, tels que les moellons, pierres de taille ou éléments

de grand appareil, qui participent directement à la structuration portante des ouvrages. Les matériaux meubles sont quant à eux employés soit en volume comme matériaux de blindage ou de remblai, soit après transformation ou mise en forme, notamment comme liants ou matériaux d'appoint (mortiers, terres crues, terres cuites), leur faible cohésion initiale limitant leur usage comme éléments porteurs individualisés.

Le cycle de vie des géomatériaux du bâti, formalisé par Fronteau et al. (2019), s'étend de l'extraction à la réutilisation ou à l'abandon, en passant par le transport, la mise en œuvre et l'usage (fig. 4.46). Dans le cadre de cette thèse, le fort de Nogent-l'Abbesse a constitué l'objet d'étude principal, pour lequel seules certaines étapes de ce cycle sont mobilisées, en fonction des objectifs géomorphologiques poursuivis. L'analyse des matériaux en place permet d'identifier les types d'emploi (g), voire de réemploi (h), ainsi que les traces d'altération du bâtiment (i), dont la pérennité semble directement liée à l'intégrité morphologique des polémoformes Séré de Rivières. Elle constitue surtout un point d'entrée vers l'identification des gisements d'approvisionnement, à la base du cycle, à partir de laquelle peut être envisagée l'étude des sites d'extraction, ainsi que des modalités de transport et de mise en œuvre des matériaux, susceptibles d'avoir généré des perturbations morphologiques spécifiques dans le paysage.

Plusieurs méthodes d'investigation peuvent être utilisées dans l'étude de ce cycle (fig. 4.46). Les deux sections suivantes présentent celles employées pour la détermination lithologique et la recherche de traces géomorphologiques associées.

4.4.1.2. Étude des géomatériaux *stricto sensu*

La méthodologie employée dans l'analyse des matériaux, synthétisée dans la figure 4.47 a consisté en la reproduction de celle mise en œuvre par Laratte (2022) dans l'étude du Reims antique. Elle a notamment été réalisée sur une partie du casernement et de la caponnière double du fort de Nogent-l'Abbesse, et se décline en trois composantes complémentaires.

La première composante repose sur le relevé précis du calepinage et sur un enregistrement pierre à pierre de la nature des matériaux et de leurs usages architecturaux. Compte tenu du caractère secondaire de cette étude par rapport aux objectifs globaux de la thèse, les analyses pétrographiques en lame mince n'ont pas été effectuées. La détermination des faciès a été réalisée à partir d'observations macroscopiques sur cassures « fraîches » déjà présentes, à l'aide d'une loupe x10. Ces observations ont été menées en collaboration avec Gilles Fronteau, qui est notamment spécialisé dans l'identification des roches sédimentaires de l'est du Bassin parisien (Fronteau, 2000).

La classification des roches utilisée pour l'identification s'appuie sur la méthode développée dans le cadre du PCR « *Évolution typologique et technique des meules du Néolithique à l'an mille*

sur le territoire français » (Buschenshutz et al., 2017) reprise et adaptée à la région rémoise (voir notamment Laratte, 2022b). Elle consiste en la description en trois niveaux combinant : (i) attribution à une grande catégorie lithologique (calcaire, grès, *etc.*), (ii) précision du sous-faciès lithologique (calcaire à milioles, grès ferrugineux, *etc.*) (iii) la description macroscopique plus poussée, impliquant l'analyse de caractéristiques telles que la granulométrie, la texture, la couleur ou la présence de fossiles, *etc.*

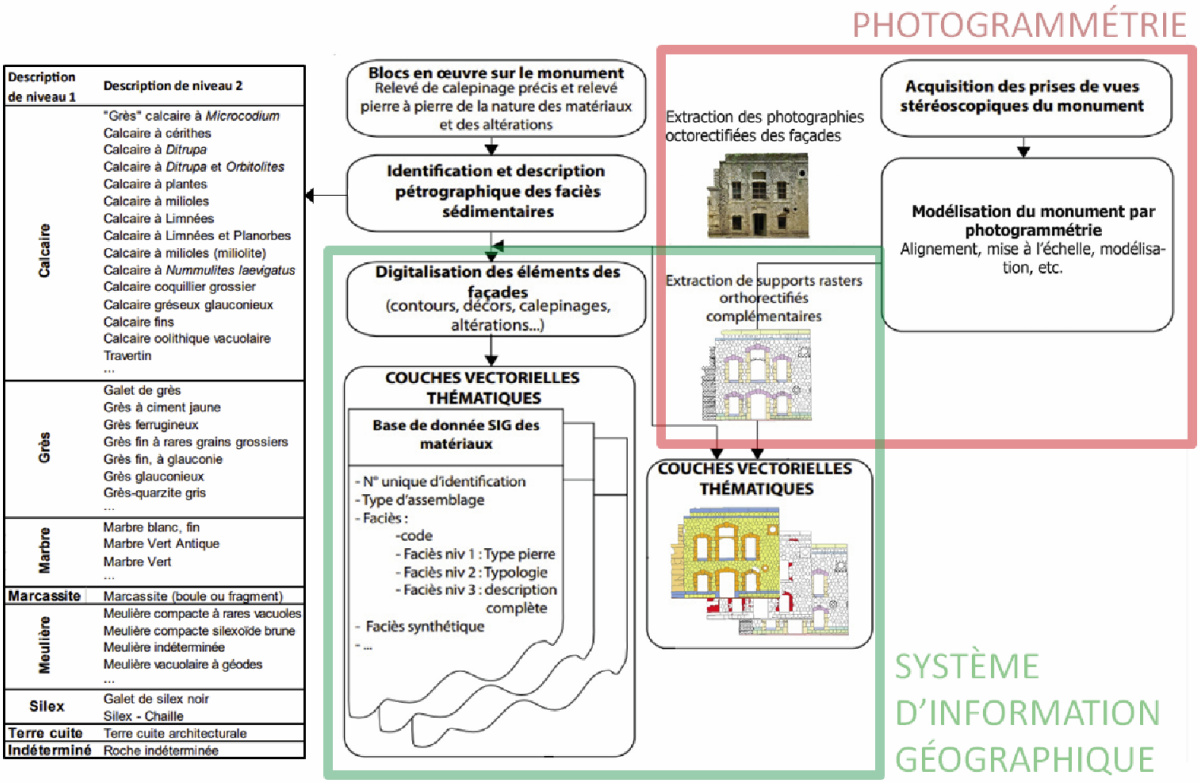


Figure 4.47 : Synthèse de la méthodologie employée dans l'étude des géomatériaux (Ancelin et al., 2024 ; d'après Laratte, 2022b).

Lorsque l'information est disponible, les pierres sont également désignées par leur appellation-type fondée sur leur zone de production, qu'elle corresponde ou non à une terminologie historiquement employée (*e.g.*, calcaire à entroques de type Euville, calcaire marbrier bleu de type Givet, *etc.* ; Fronteau et al., 2019 ; Fronteau et Lelarge, 2022).

La deuxième composante repose sur une acquisition photogrammétrique des façades du fort de Nogent-l'Abbesse, réalisée par Sébastien Laratte (Laratte, 2022a).// Elle vise à disposer d'un support métrique précis pour le relevé pierre à pierre des élévations. Le traitement des prises de vues permet la production d'un modèle tridimensionnel texturé et d'orthophotographies métriques exploitables sous SIG.

La troisième composante correspond à la structuration des données sous SIG. Les éléments des façades ont été digitalisés sous QGIS 3.28.12 à partir des supports photogrammétriques,

chaque entité étant associée aux niveaux de description pétrographique et aux usages architecturaux observés. Cette approche permet d'analyser la distribution spatiale des faciès et les logiques d'emploi dominantes.

La détermination pétrographique des géomatériaux sur le site de construction constitue ainsi un complément indispensable à l'identification des gisements mobilisés et à l'analyse des traces géomorphologiques associées aux stratégies d'approvisionnement.

4.4.1.3. Étude du site d'extraction au site de construction

L'étude des géomatériaux ne se limite pas à la caractérisation des matériaux mis en œuvre au sein des ouvrages fortifiés. Elle constitue également un point d'entrée privilégié pour identifier et analyser les traces géomorphologiques associées à leur cycle de vie, en particulier celles liées à l'extraction, à l'acheminement et à la mise en œuvre nécessaires à la construction des forts Séré de Rivières (fig. 4.46).

La connaissance précise des gisements mobilisés permet de documenter les sites d'extraction potentiels, d'envisager les modalités de transport entre ces sites et les ouvrages, et d'identifier d'éventuelles structures ou aménagements associés à ces opérations (*e.g.*, carrières, rampes de roulage, chemins d'accès, chantiers de construction). Ces éléments, souvent discrets ou partiellement effacés, peuvent constituer des polémoformes indirectes liées aux aspects logistiques de la phase de construction (Hesse, 2014) et participer à l'empreinte morphologique globale du système fortifié.

Fronteau et al. (2014) proposent d'aborder ces aires d'approvisionnement à travers le concept de district carrier, inspiré à la fois du concept de grand centre carrier de Lorenz et Lorenz (1993) et de celui de district industriel formulé par Marshall (1890). Il désigne un ensemble géographique cohérent dédié à l'exploitation industrielle d'un matériau, structuré par la connaissance des gisements et des techniques d'extraction, ainsi que par une logique économique de réduction des coûts (concentration des sites, réseau d'acheminement communs).

Dans cette perspective, l'origine multiscalaire des géomatériaux est abordée à partir d'un diagramme de classification des pierres fondé sur la distance séparant le site d'extraction du site d'emploi (fig. 4.48). Ils en ressort cinq aires d'approvisionnement que sont (Fronteau et al., 2014) :

- le périmètre immédiat correspondant au sous-sol directement accessible sur le site de construction et à sa périphérie ;
- le périmètre attenant, jusqu'à 4-5 km, permettant d'effectuer plusieurs allers-retours au sein d'une même journée ;

- le périmètre local situé à une journée de voyage pédestre ou hippotracté (20 km) ;
- le périmètre régional concernant les approvisionnements venant d'une zone jusqu'à 90-100 km ;
- le périmètre extra-régional lorsque la distance est supérieure à 100 km.

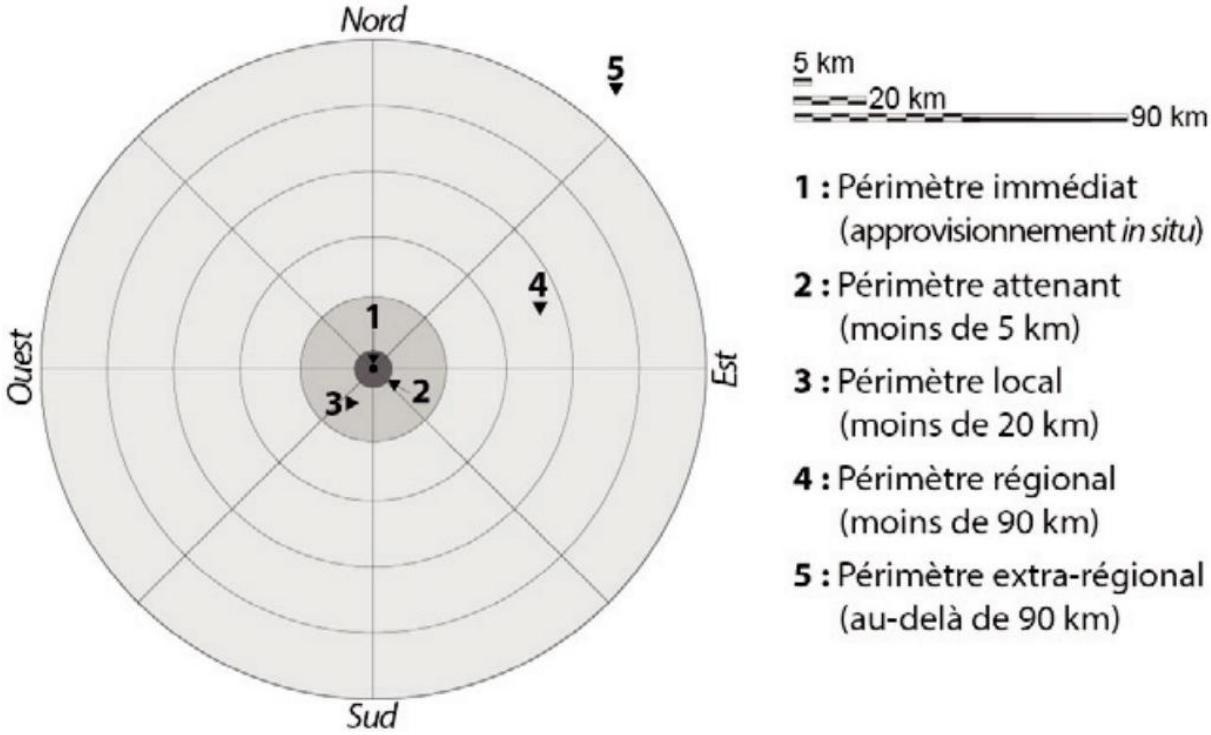


Figure 4.48 : Échelle de classification des approvisionnements en pierre en fonction de la distance entre le site d'extraction et le site d'emploi du matériau (Laratte, 2022b ; d'après Fronteau et al., 2014).

Le repérage des districts carriers permet ensuite d'aborder les morphologies associées aux sites d'extraction, qui peuvent être d'érosion, fruit direct de l'extraction (creusements, fronts de taille), ou de sédimentation, induite par les rejets (haldes, déblais ; Chauris, 2009), des matériaux vers les ouvrages. Dans l'étude entreprise ici, l'attention est surtout portée sur les formes liées à l'acheminement terminal, notamment après la rupture de charge intervenant après le mode d'acheminement principal, telles que les voies, rampes, plans inclinés ou plateformes intermédiaires. Cette analyse morphologique repose principalement sur l'inventaire LiDAR réalisé sur les secteurs concernés (*cf.* partie 4.3.3.2), incluant des sites placés dans des périmètres immédiats, attenants et locaux (fig. 4.48).

Les sources archivistiques constituent enfin un complément essentiel à ces investigations. Elles incluent notamment l'atlas de Poinsignon (*cf.* partie 4.2.2.5), le répertoire des carrières de pierre de taille de établi par Durand-Claye et Debraye en 1890 (fig. 4.49 ; « *composé, pour chaque département du territoire français, de tableaux sur double pages avec indication, par cantons, puis par communes, des différentes carrières en exploitation* » ; Fronteau et Lelarge, 2022), de documents microhistoriques (*cf.* partie 4.1.2.4) et des cours de construction militaires, en

particulier ceux synthétisés par Garnier (2016) dans son manuscrit intitulé « *Fortification permanente Séré de Rivières, construction de la carrière au fort, 1874-1885* ».

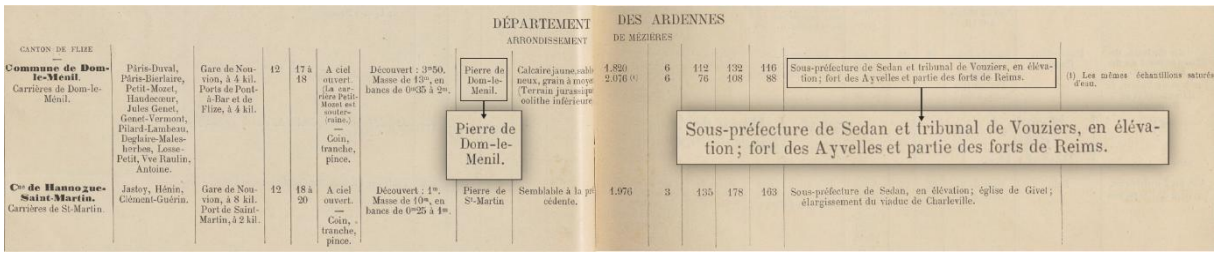


Figure 4.49 : Extrait du répertoire des carrières de pierre de taille exploitées en 1889 où est mentionné l'emploi de la pierre de « Dom-le-Menil » dans la construction des forts de Reims (Durand-Claye et Debraye, 1890).

En complément des observations des géomatériaux sur le terrain et de l'étude des traces associées à leur extraction et à leur acheminement, une acquisition LiDAR terrestre exploratoire a été menée afin de documenter les volumes souterrains et l'organisation spatiale des substructures.

4.4.1.4. Méthodologie d'acquisition LiDAR terrestre des souterrains (Leica BLK2GO)

Une acquisition LiDAR terrestre des substructures du fort de Montbré a été réalisée le 27 juin 2025, à l'aide d'un capteur Leica BLK2GO.

La préparation de l'acquisition a nécessité l'établissement d'un plan d'action tenant compte à la fois de l'extension du réseau souterrain (plusieurs kilomètres), de la durée limitée de présence sur site (une journée) et des contraintes instrumentales propres au capteur. L'acquisition s'est ainsi concentrée sur des secteurs représentatifs de l'organisation interne du fort : l'entrée, le casernement, les traverses-abris ouest, le magasin à poudre, la caponnière simple ouest, la descenderie et sa caponnière double (fig. 4.50).

Le Leica BLK2GO dispose d'une autonomie théorique d'environ 50 minutes, mais reste sensible aux phénomènes de dérive, caractérisés par une accumulation progressive d'erreurs de position et d'orientation lors des acquisitions longues. Afin de limiter ces effets, les relevés ont été fractionnés en séquences de 30 à 35 minutes maximum. L'acquisition a donc été structurée en 12 sous-acquisitions (ou stations), préalablement définies à partir de la documentation planimétrique disponible.

Les stations ont été conçues de manière à présenter des zones de recouvrement significatives dans des espaces caractéristiques (pièces communes, cours de casernement, intersections de galeries), afin de faciliter leur recalage et leur fusion lors du post-traitement. Ce recouvrement conditionne directement la qualité de l'assemblage final du nuage de points.

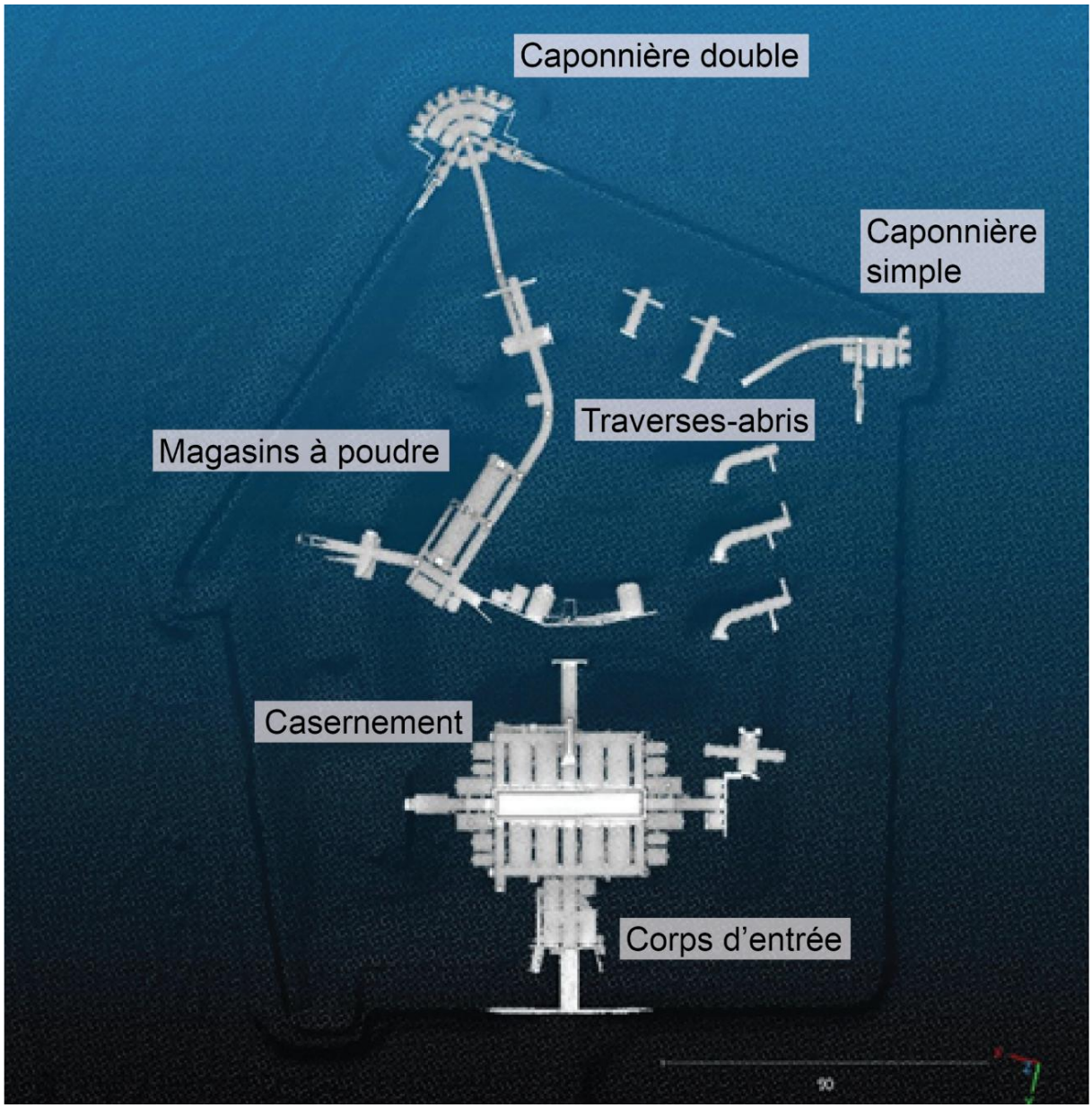


Figure 4.50 : Levé LiDAR terrestre des structures souterraines du fort de Montbré nettoyé et sous-échantillonné (blanc) et MNT LIDAR HD (gris).

La fusion de l'ensemble des acquisitions sur le logiciel Cyclone REGISTER 360 (BLK Edition) 2025.0.0 a permis de générer un nuage de points brut d'environ 2,5 milliards de points, correspondant à une densité moyenne proche de 10 points par centimètre carré. Ce nuage a ensuite fait l'objet d'un nettoyage via le logiciel CloudCompare 2.12.4 visant à supprimer les éléments non architecturaux et les artefacts (végétation, bruit, espaces extérieurs), puis d'un sous-échantillonnage à une résolution de 1 cm. Ce choix permet d'alléger significativement le volume de données tout en conservant un niveau de détail compatible avec l'échelle de visualisation et d'analyse morphologique retenue dans la suite du travail. Cette analyse implique notamment la réalisation d'un profil topographique et l'interprétation d'images extraites en 2,5D, en combinaison avec les données LiDAR

aéroportées, permettant de mieux cerner le volume des substructures par rapport au volume total.

L'acquisition LiDAR terrestre du fort de Montbré et l'exploitation des données microtopographiques à très haute résolution associées complètent la caractérisation lithologique des géomatériaux, réalisée à partir des analyses sous SIG et de la photogrammétrie. Elle optimise également l'identification de traces géomorphologiques d'ordre logistique, fondée sur le croisement du LiDAR aéroporté et des sources d'archives. Ce dispositif méthodologique permet de documenter, à une échelle fine, les substructures maçonnées des forts Séré de Rivières et les éventuelles morphologies associées à leur mise en place, ce qui enrichit la lecture planimétrique des morphologies Séré de Rivières. L'étude de la biocénose, présentée dans la section suivante, prolonge ce cadre méthodologique en élargissant l'analyse de terrain à la verticalité et à la dimension paysagère des forts.

4.4.2. Étude de la biocénose

Afin de documenter les héritages écologiques induits par les polémoformes et les morphologies fortifiées, l'analyse morphologique et géohistorique est complétée par une étude de terrain de la végétation. Celle-ci vise à caractériser, à une échelle fine, la réponse des formations végétales actuelles aux perturbations morphologiques héritées de la construction des fortifications et de la Première Guerre mondiale.

La végétation a été caractérisée à partir d'un relevé botanique itinérant réalisés sur plusieurs forts, inspiré de la méthode proposée par Theau et al. (2010). Les résultats ont été plus particulièrement formalisés pour le fort de Brimont, dont l'analyse a donné lieu à la rédaction d'un article (Ancelin et al., soumis). La démarche a consisté en une prospection de terrain en collaboration avec Philippe Laporte, botaniste de l'URCA, visant à inventorier les essences dominantes des strates arborée, arbustive et herbacée au sein de surfaces floristiquement homogènes (fig. 4.51). Ces unités ont été définies en amont à partir de l'analyse des caractéristiques biogéographiques du site (*cf.* partie 3.1.5.2 et 3.1.5.3) et de la consultation des BD écologiques, environnementales et forestières disponibles en ligne (*e.g.*, BD Forêt® v2, orthophotographies).

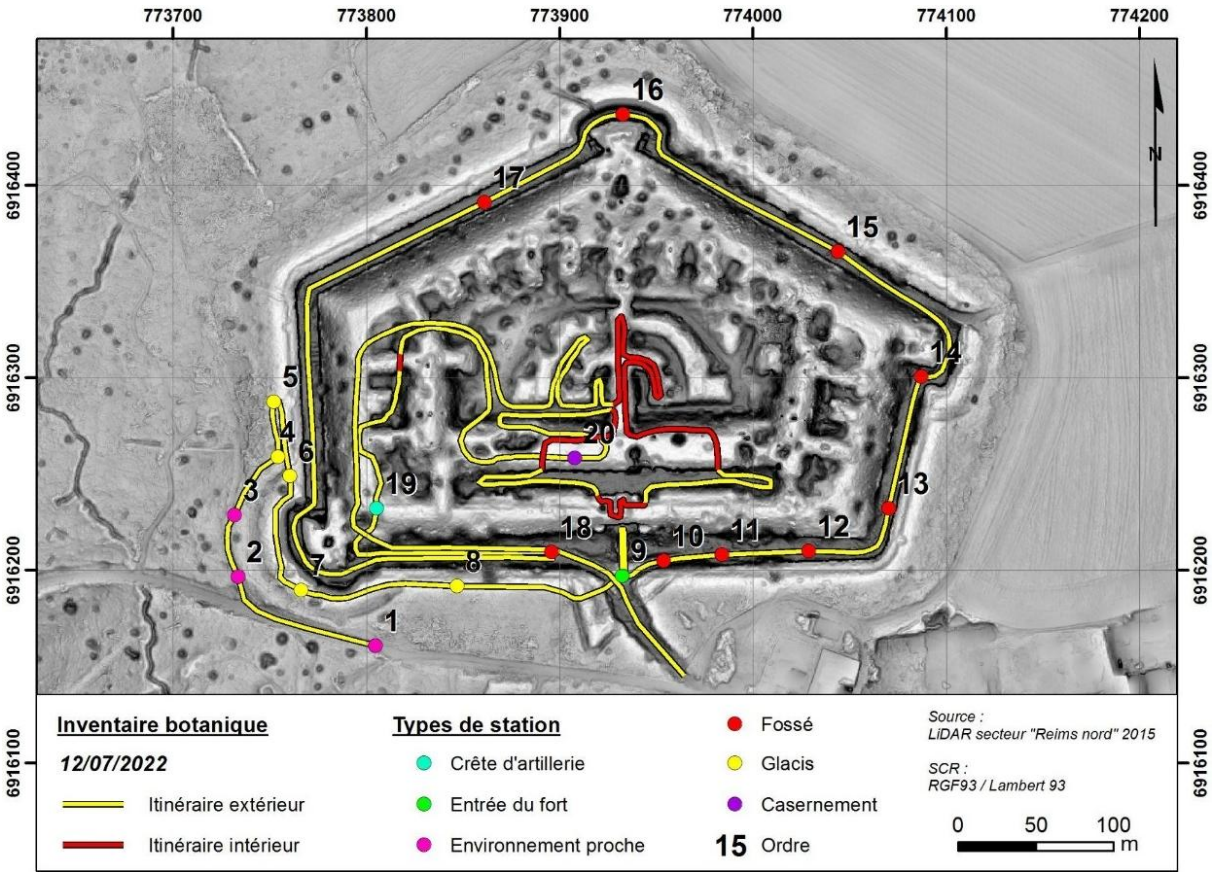


Figure 4.51 : Itinéraire de l'inventaire botanique et types de stations étudiés sur le fort de Brimont le 12 juillet 2022.

Les relevés botaniques ont généralement été menés en juin-juillet, période correspondant à la pleine activité végétative des essences caducifoliées, lorsque l'expression des strates arborée, arbustive et herbacée est maximale et facilite l'identification des cortèges végétaux caractéristiques de la région rémoise. L'inventaire a été formalisé sous la forme d'un tableau attributaire réalisé sous Excel, dans lequel sont reportés un identifiant, les informations taxonomiques et nomenclaturales, ainsi que les principales exigences écologiques associées à chaque taxon (tab. 4.17).

NUMERO	NOM VERNACULAIRE	GENRE	ESPECE	SOUS ESPECE	FAMILLE	OPTIMUM ECOLOGIQUE			
						LUMIERE	EAU	SOL	AUTRE
1	Arum tacheté ou Gouet	Arum	maculatum		ARACEES	Sciaphile	Mésophile à Mésohygrophile	Neutrophile	Nitrophile
17	Noisetier ou Coudrier	Corylus	avellana		BETULACEES	Sciaphile à semi-sciaphile	Mésophile	Neutrophile à large amplitude	
108	Erable plane	Acer	platanoides		SAPINDACEES	Semi-sciaphile	Mésophile	Neutrophile	
25	Erable sycomore	Acer	pseudoplatanus		SAPINDACEES	Sciaphile à semi-sciaphile	Mésophile	Neutrophile à large amplitude	
	Charme	Carpinus	betulus		BETULACEES	Sciaphile à semi-sciaphile	Mésophile	Neutrophile à large amplitude	
24	Frêne commun	Fraxinus	excelsior		OLEACEES	Héliophile à semi-sciaphile	Mésohygrophile à mésophile	Neutrophile	
9	Aubépine monogyne ou Aubépine à un style	Crataegus	monogyna		ROSACEES	Héliophile à semi-sciaphile	Mésophile à mésoxérophile	Neutrophile à large amplitude	

Tableau 4.17 : Extrait de l'inventaire botanique réalisé au fort de Brimont formalisé sur Excel (réalisation : Philippe Laporte).

En parallèle des relevés botaniques, un herbier photographique a été constitué à des fins de documentation et d'aide à la détermination, par la prise de clichés des taxons observés *in situ* (fig. 4.52). Cet herbier, de nature exploratoire, n'a pas été formalisé de manière homogène

pour l'ensemble des forts étudiés et n'est mobilisé qu'à titre de support complémentaire aux relevés de terrain.



Figure 4.52 : Exemples d'espèces végétales photographiées sur le fort de Nogent-l'Abbesse en juin 2022 pour constituer un herbier numérique aidant à l'interprétation des taxons. A : Trèfle des prés (*Trifolium pratense*) ; B : Orchis moucheron (*Gymnadenia conopsea*) ; C : Bédégar provoqué par le Cynips du rosier (*Diplolepis rosae*) ; D : Vipérine (*Echium vulgare L.*).

Ces relevés ont permis l'élaboration de transects de végétation restituant la distribution des formations végétales en relation avec les reliefs anthropiques hérités, en particulier sur la partie externe des fortifications, constituée du rempart, du fossé et du glacis (fig. 4.41A). Les résultats issus de ce cas d'étude sont ensuite replacés à l'échelle de l'ensemble de la ceinture fortifiée de Reims, afin d'interroger le rôle différencié des ouvrages dans les trajectoires de (re)végétalisation et dans l'organisation actuelle des continuités écologiques.

Cette mise en perspective permet de discuter l'influence conjointe du contexte géomorphologique et de l'occupation du sol, en particulier pour les ouvrages implantés en milieu agricole, dont le fonctionnement écologique est étroitement lié aux dynamiques de fragmentation des habitats (Andersson et al., 2021).

En complément, une méthode de photo-interprétation a été appliquée sur la butte de Brimont pour étudier la recolonisation végétale intervenue après la fin de la guerre. Cinq photographies aériennes, prises pendant le cycle végétatif, ont été interprétées visuellement selon la méthode exposée par Gallet-Moron et al. (2019). Il s'agit de documents photographiques mis à disposition par la plateforme Remonter le temps pour les années 1949, 1957, 1972, 1990 et de la BD ORTHO® de l'IGN pour 2015. Le secteur d'étude a pour cela été découpé en une maille composée de cellules de 2 500 m² (50 x 50 m). Un type d'occupation du sol a ensuite été attribué à chaque cellule (couverture arborée continue, discontinue, couverture arbustive et/ou herbacée, espace agricole, espace bâti, sol nu, eau).

En définitive, l'approche biogéographique mise en œuvre repose principalement sur des relevés botaniques de terrain ciblés et contextualisés, visant à documenter la végétation en

relation directe avec les fortifications. Elle fournit un cadre d'observation adapté à la diversité des situations paysagères rencontrées, sans prétendre à une exhaustivité floristique, et sert de base méthodologique à l'analyse des relations entre polémoformes et formations végétales présentée dans la suite du travail.

Les études de terrain présentées dans cette section constituent un complément méthodologique essentiel aux analyses menées sous SIG et à partir des données LiDAR. En réintroduisant une observation directe des structures bâties et de la végétation, elles permettent d'ancrer l'interprétation des polémoformes dans leur matérialité et leurs contextes environnementaux actuels. L'étude des géomatériaux et des dynamiques de végétation permet ainsi de mieux contextualiser les formes identifiées et d'en affiner l'interprétation.

Conclusion du chapitre 4

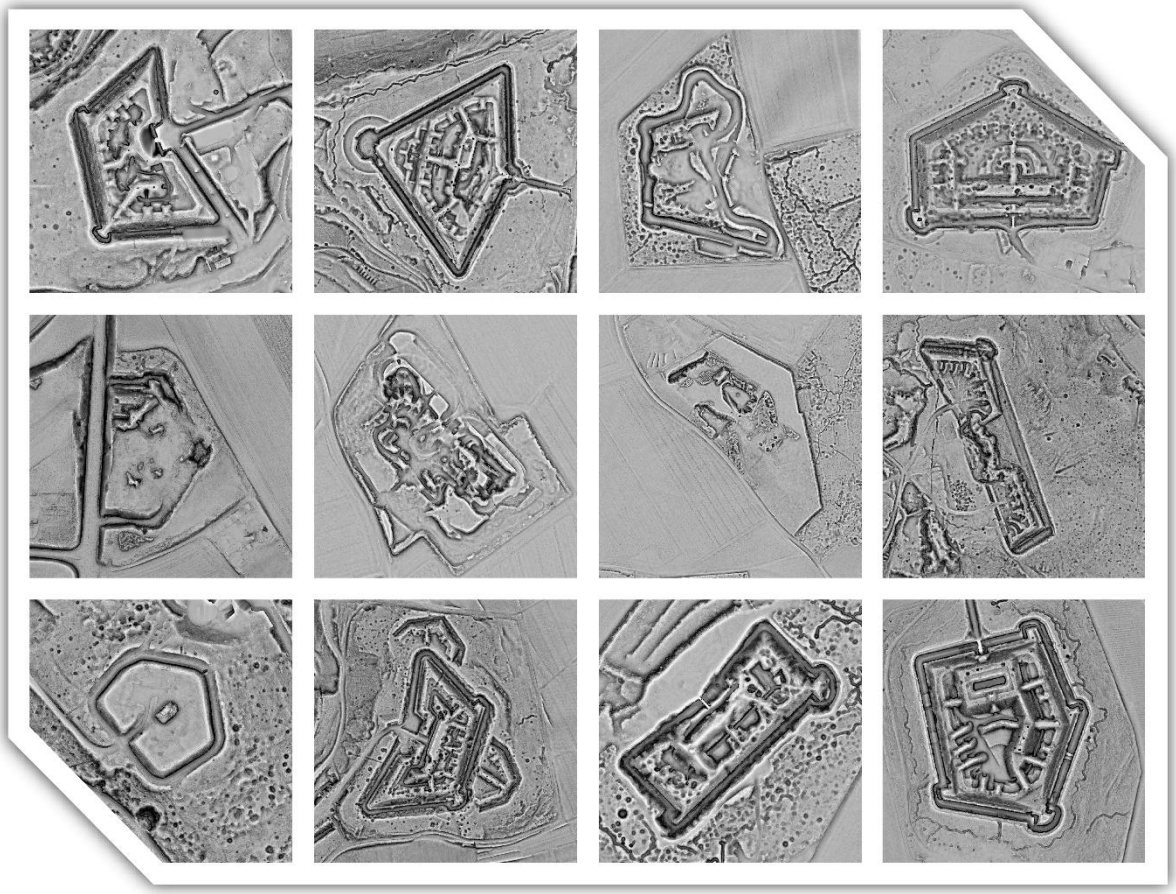
L'approche centrale de cette thèse repose sur l'analyse spatiale et morphologique des forts Séré de Rivières de Reims à partir de données LiDAR exploitées sous SIG. La démarche méthodologique s'inscrit dans la suite opératoire proposée par Lozić et Štular (2021), visant à standardiser les pratiques à travers un enchaînement de 18 étapes organisées en quatre phases. Dans ce cadre, un protocole de digitalisation spécifique aux forts de type 1874 a été développé, structuré selon les grandes fonctions défensives des ouvrages (action lointaine, défense rapprochée, intendance), afin de produire un inventaire morphologique homogène et comparable. La phase relative à la diffusion et à l'archivage des données (phase 4) constitue un prolongement nécessaire de la suite d'opérations, qui sera développé après la thèse afin de formaliser des pratiques pérennes de valorisation et de conservation des données.

Cette approche principale est complétée par des dispositifs méthodologiques parallèles mobilisant une perspective interdisciplinaire. Les sources archivistiques manuscrites et cartographiques permettent d'affiner l'identification des formes, de documenter leurs transformations et d'éclairer leur inscription historique. Si ces corpus demeurent lacunaires au regard de la documentation initialement produite, ils offrent néanmoins un matériau exceptionnel pour une analyse géomorphologique de formes anthropiques récentes, où il est possible d'articuler morphologie, matériaux constitutifs et trajectoires de transformation, dans des proportions rarement accessibles pour d'autres objets géomorphologiques.

Les investigations de terrain complètent ce dispositif en réintroduisant la dimension verticale, bâtie et volumétrique des fortifications, partiellement atténuée par les traitements numériques et la lecture planimétrique de la modélisation numérique. Elles permettent de consolider l'interprétation morphologique et d'ancrer l'analyse dans la matérialité des ouvrages et de leurs environnements.

L'ensemble de ces approches combinées fournit le cadre méthodologique à partir duquel est engagé, dans les chapitres suivants, l'inventaire et l'analyse morphologique et morphogénétique de la dimension fortifiée du palimpseste topographique du paysage rémois.

CHAPITRE 5 : INVENTAIRE ET ANALYSE SPATIALE DES MORPHOLOGIES RÉVÉLÉES AU LIDAR



Forts de la ceinture de Reims
(MNT LIDAR HD traité visuellement des indices de pente et LRM en transparence ; 2023, IGN)

5. INVENTAIRE ET ANALYSE SPATIALE DES MORPHOLOGIES RÉVÉLÉES AU LIDAR

Ce chapitre constitue le socle morphologique descriptif sur lequel s'appuient l'analyse morphogénétique et l'interprétation des héritages géographiques réalisées dans le chapitre 6. Il s'attache à l'étude de la part de l'archéologie dans le paysage géomorphologique actuel à partir d'une objectivation des formes détectées par LiDAR et inventoriés, en se concentrant particulièrement sur les formes associées au paysage de la fortification Séré de Rivières et à la guerre.

Comprendre la morphologie actuelle des forts impose d'en décomposer les strates, de distinguer les éléments constitutifs des forts eux-mêmes de ceux venus s'y greffer, s'y substituer, s'y superposer ou les masquer, ce qui justifie que l'intérêt soit également porté, de manière moins approfondie, sur les polémoformes de la Première Guerre mondiale et les autres formes archéologiques.

Les morphologies du palimpseste topographique actuel, retranscrites à travers l'inventaire cartographique, sont pour cela décrites du point de vue de leur géométrie, de leur volume et de leur organisation spatiale, afin d'en proposer une « photographie » morphométrique et spatiale.

Le chapitre s'ouvre par une cartographie générale des formes détectées (5.1), avant d'en proposer une lecture différenciée selon les trois grandes catégories retenues que sont les fortifications permanentes (5.2), les polémoformes de la Première Guerre mondiale (5.3) et les autres éléments archéologiques ou indéterminés (5.4).

5.1. Inventaire global

Cette sous-partie dresse une synthèse quantitative et spatiale des anomalies topographiques détectées et cartographiées dans le périmètre d'étude, comprenant le Massif de Saint-Thierry, les buttes de Brimont et de Berru, ainsi que les trois avant-buttes crayeuses sur lesquelles se situe également une fortification Séré de Rivières (forts de la Pompelle, Montbré et Fresne ; fig. 3.16C). Sans entrer encore dans le détail fonctionnel ou chronologique, elle offre une première lecture du palimpseste topographique, qui sera affinée dans les sections suivantes.

Les figures 5.1 à 5.4A-C présentent l'inventaire global des formes identifiées selon une typologie simplifiée. Le tableau 5.1A-C en résume les caractéristiques par type de vecteur utilisé sous SIG (polylignes, polygone, point) : effectifs, linéaires cumulés, surfaces, répartitions sectorielles.

Environ 26 500 formes ponctuelles ont été recensées dont 92 % de cratères d'obus. Les autres morphologies correspondent principalement à des structures militaires (environ 2 200 entités), les plateformes de charbonnage demeurant anecdotiques (six entités). Cette surreprésentation des cratères traduit l'importance des tirs d'artillerie pendant la Première Guerre mondiale et leur empreinte durable sur la topographie.

Parmi les formes linéaires, les épaulements (d'origine militaire ou non ; 115 km), les tranchées militaires (84 km) et les fossés (40 km) dominent, totalisant à eux seuls un linéaire d'environ 240 km réparti sur 7 500 entités, complété localement par des levées et les voies militaires étroites.

Les sites d'extraction et les fortifications Séré de Rivières constituent les surfaces les plus étendues, avec respectivement environ 150 et 50 hectares, soit 99 % des surfaces cartographiées en polygones. Certaines carrières atteignent individuellement une quinzaine d'hectares sur le Mont de Berru et exceptionnellement jusqu'à 50 ha sur le Massif de Saint-Thierry. Les forts présentent des superficies maximales d'environ 7 ha (forts de Brimont, Witry-lès-Reims). Cette ampleur s'accompagne d'une forte complexité interne nécessitant de dissocier une échelle d'analyse morphologique globale et une autre portée sur les composantes internes.

Les densités révèlent des contrastes au sein de ces valeurs absolues présentées dans le tableau 5.1A-C. Pour les polygones, la butte de Brimont (5 km²) affiche 28 000 m² par km², la butte de Berru (19 km²), 59 000 m² par km² et le Massif de Saint-Thierry (8 km²), 89 000 m² par km². Cette différence est notamment relative aux surfaces couvertes par les carrières, les emprises fortifiées restant proches sur les trois sites. La densité de polylignes, plus homogène, s'établit autour de 7 000-8 500 m/km². Les entités ponctuelles présentent

un ratio d'environ deux pour un entre les monts de Berru et de Brimont (*c.* 1 000 entités par km²) et le Massif de Saint-Thierry (450 entités par km²), qui s'atténue si l'on exclut les cratères. Les valeurs se situent alors entre 90 et 120 entités par km².

A

	Fort Séré de Rivières		Carrière		Verse		Glissement		Total	
	surf. (m²)	*nb.*	*surf. (m²)*	*nb.*	*surf. (m²)*	*nb.*	*surf. (m²)*	*nb.*	*surf. (m²)*	*nb.*
MdBr	112 231	3	23 054	24	4 268	1	/	/	139 553	28
MdBe	192 150	4	928 692	117	/	/	3 385	1	1 124 227	122
MdST	82 788	2	616 230	42	11 161	3	/	/	710 179	47
Autres	111 694	3	/	/	/	/	/	/	111 694	3
Total	498 863	12	1 567 976	183	15 429	4	3 385	1	2 085 653	200

B

	Epaulement		Fossé		Levée		Tranchée		Voie étroite		Total	
	lin. (m)	*nb.*	*lin. (m)*	*nb.*	*lin. (m)*	*nb.*	*lin. (m)*	*nb.*	*lin. (m)*	*nb.*	*lin. (m)*	*nb.*
MdBr	15 569	369	998	100	217	2	18 646	902	/	/	35 430	1 373
MdBe	68 397	1 107	24 478	852	992	35	42 541	1 986	3 596	50	140 004	4 030
MdST	30 310	623	14 645	350	2 158	57	21 144	842	/	/	68 257	1 872
Autres	877	10	56	1	129	4	1 951	145	/	/	3 013	160
Total	115 153	2 109	40 177	1 303	3 496	98	84 282	3 875	3 596	50	246 704	7 435

C

	Stucture militaire	Cratère d'obus	Plateforme de charbonnage	Total
MdBr	303	4 479	/	4 782
MdBe	1 064	16 381	6	17 451
MdST	828	2 855	/	3 683
Autres	4	565	/	569
Total	2 199	24 280	6	26 485

Tableau 5.1 : Statistiques générales de l'inventaire cartographique réalisé à partir des données LiDAR, par type de vecteur et par secteur. A : Formes représentées en polygones ; B : Formes représentées en polylignes ; C : Formes représentées en points. MdBe : Mont de Berru (19 km²) ; MdBr : Mont de Brimont (5 km²) ; MdST : Massif de Saint-Thierry (8 km²) ; Autres : Secteurs des forts de Fresne, Montbré et la Pompelle (3 km²).

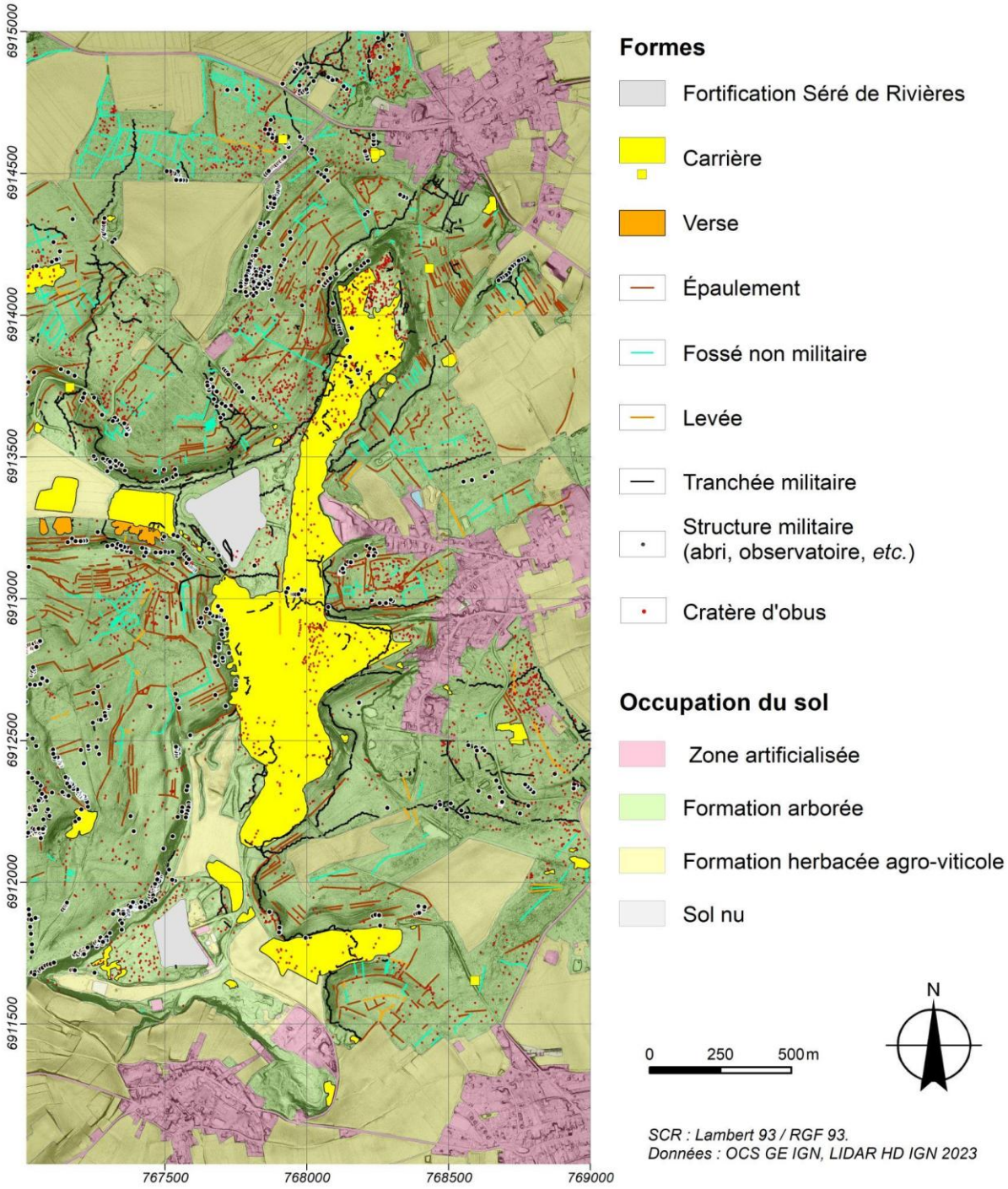


Figure 5.1 : Inventaire global des formes cartographiées dans le secteur du Massif de Saint-Thierry.

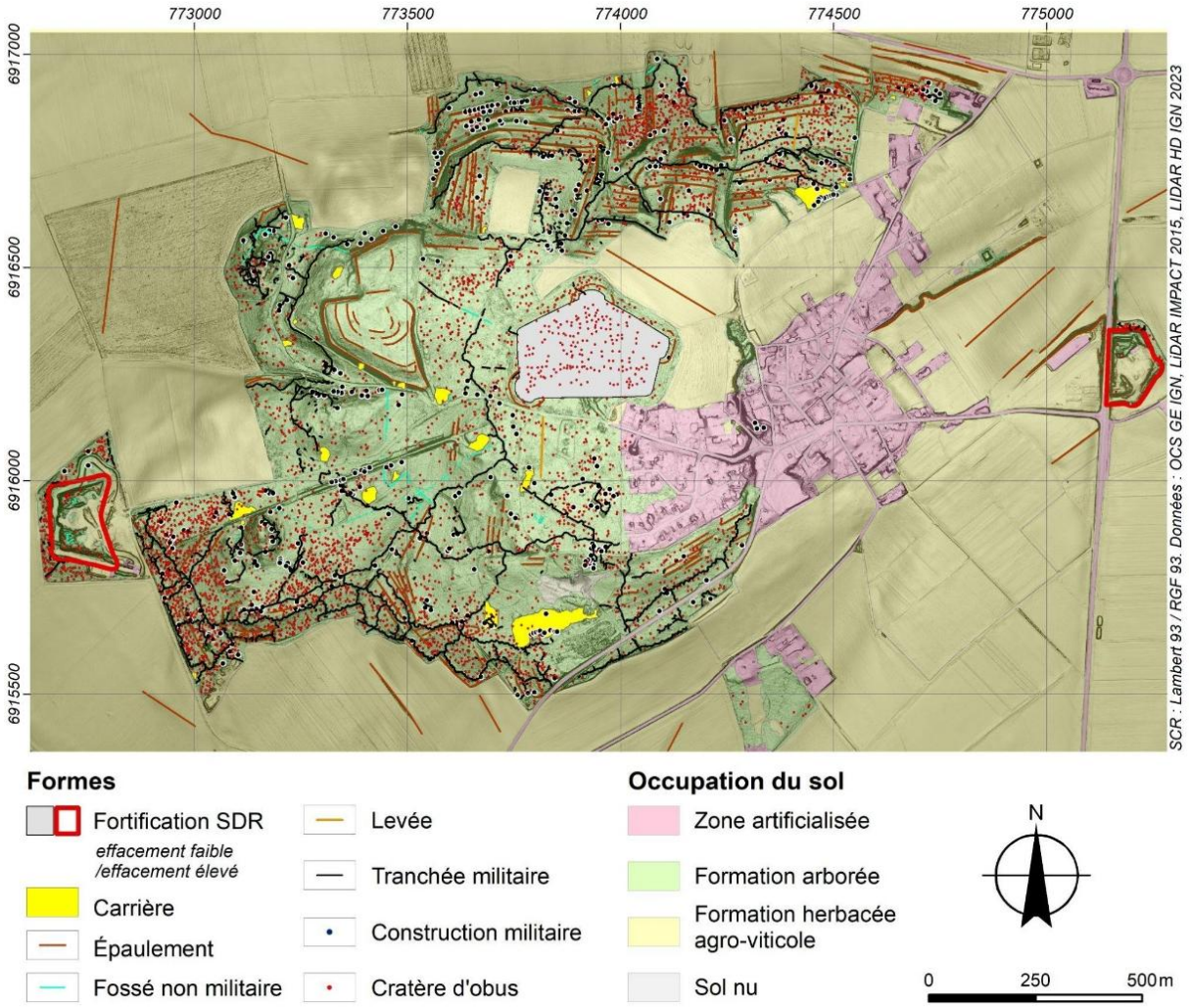


Figure 5.2 : Inventaire global des formes cartographiées dans le secteur du Mont de Brimont. SDR : Séré de Rivières.

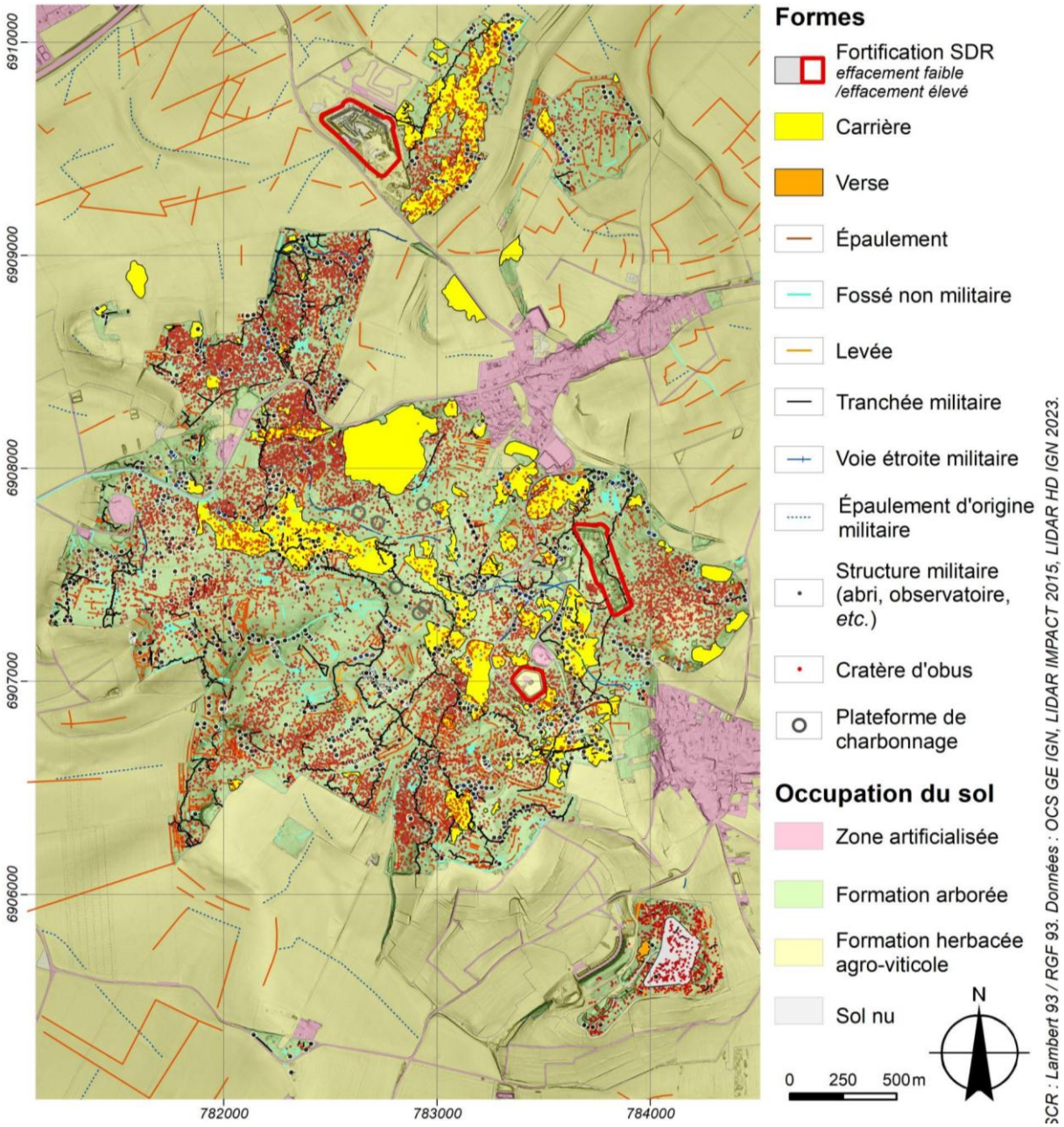


Figure 5.3 : Inventaire global des formes cartographiées dans le secteur du Mont de Berru. SDR : Séré de Rivières.

Sur les trois avant-buttes, représentant au total 3 km², les entités polylinéaires et ponctuelles sont nettement sous-représentées, avec seulement 961 m et 225 entités par km² (fig. 5.4A-C). Les surfaces cartographiées avec un vecteur polygonal y sont comparables, en raison de la présence des forts Séré de Rivières.

Dans l'ensemble des périmètres étudiés, la quasi-totalité des formes est localisée sous couvert forestier, tendant à confirmer la fonction conservatoire de la végétation sur la topographie et les reliefs créés par les sociétés humaines (Georges-Leroy et al., 2009). Seuls les épaulements se distinguent partiellement avec 15 % du linéaire au Mont de Brimont et

50 % au Mont de Berru situés dans la catégorie de couverture du sol « formation herbacée » de l'OCS GE.

Cet inventaire global fournit ainsi une vision d'ensemble permettant de situer chaque type de forme dans son contexte spatial et de quantifier leur importance respective. Elle constitue un préambule descriptif aux analyses morphologiques et fonctionnelles détaillées ensuite pour chaque grande catégorie de formes, en commençant par l'analyse des fortifications Séré de Rivières (5.2), suivie des morphologies liées à la Grande Guerre (5.3) et s'achevant par la présentation des autres formes archéologiques (5.4).

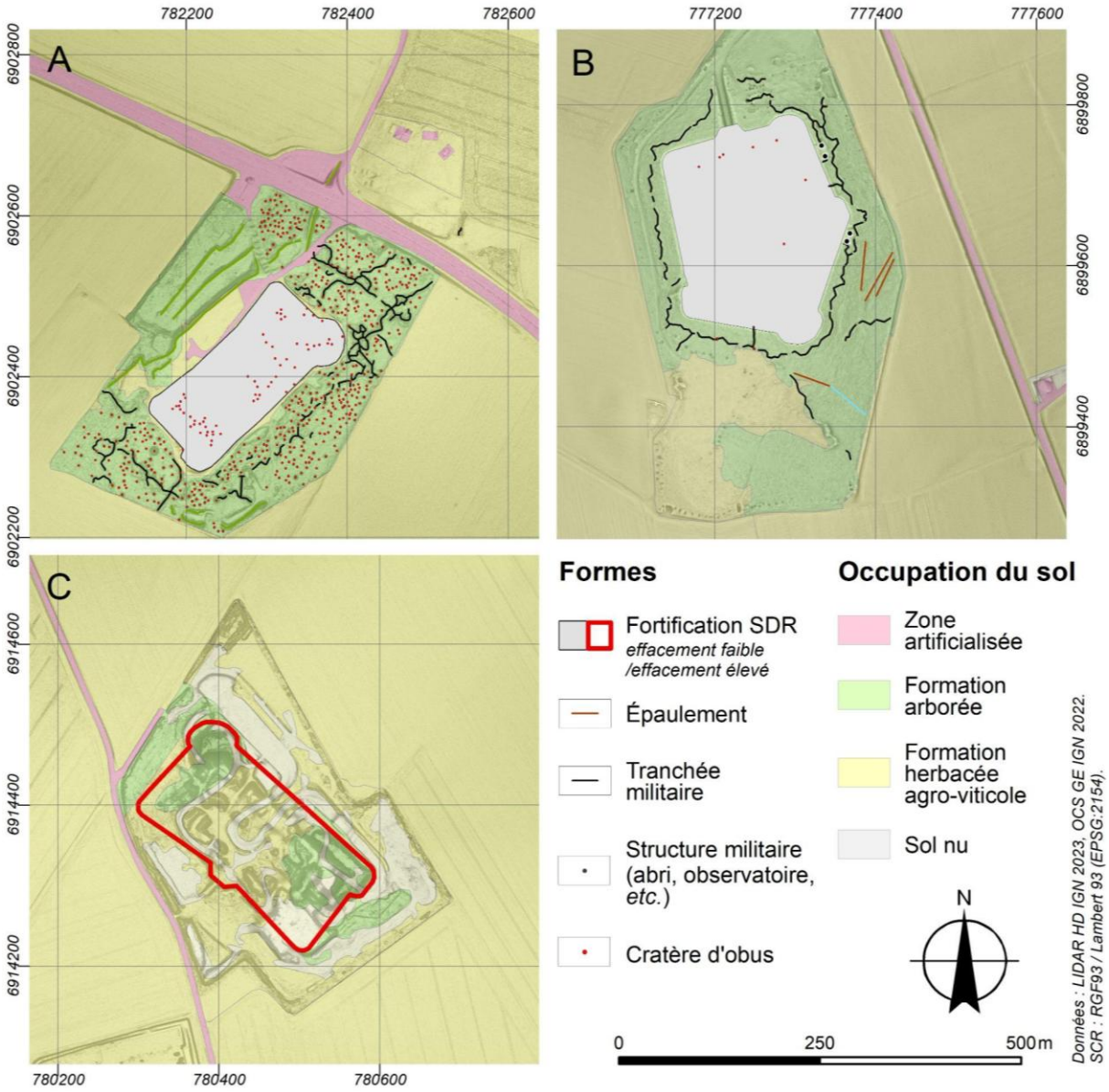


Figure 5.4 : Inventaire global des formes cartographiées dans les trois sous-secteurs individuels. A : Fort de la Pompelle ; B : Fort de Montbré ; C : Fort de Fresne. SDR : Séré de Rivières.

5.2. Fortifications Séré de Rivières

Les fortifications Séré de Rivières sont considérées comme des méga-polémoformes, figurant notamment parmi les formes les plus imposantes du champ de bataille de la Grande Guerre (Taborelli et al., 2017b ; Ancelin et al., 2023).

Leur ampleur et leur complexité morphologique imposent une lecture à deux échelles complémentaires :

- l'échelle globale, qui appréhende l'enveloppe extérieure du fort et son insertion dans le relief ;

- l'échelle interne, qui restitue l'organisation morphologique et fonctionnelle des structures.

De plus, la lisibilité morphologique des ouvrages variant fortement d'un site à l'autre, en fonction des trajectoires impliquant parfois démantèlements, destructions ou aménagements postérieurs (*cf.* partie 6.1), deux approches méthodologiques sont mobilisées :

- (i) une analyse structurelle à partir des plans et documents d'époque, intégrant les forts effacés ou partiellement détruits ;

- (ii) un inventaire strictement fondé sur les données LiDAR, limité aux morphologies actuellement visibles.

Cette distinction méthodologique permet de replacer chaque fort dans sa configuration d'origine tout en objectivant l'état présent. Ces deux perspectives, scalaire et méthodologique, sont examinées selon un enchaînement progressif s'appuyant tout d'abord sur les documents historiques pour restituer la forme globale des remparts et de la crête d'artillerie, dont les logiques défensives diffèrent (5.2.1). Les apports du LiDAR sont ensuite mobilisés afin de décrire l'état actuel de ces reliefs fortifiés, d'abord global, selon leur planimétrie, leur altimétrie et leur volumétrie (5.2.2), puis à l'échelle de leur organisation interne (5.2.3).

5.2.1. Approches planimétrique, géométrique et typomorphologique (échelle du fort)

À l'échelle du fort, l'étude des morphologies Séré de Rivières consiste dans un premier temps à caractériser la forme globale via une lecture typologique, influencée par les impératifs de défense rapprochée, et à analyser l'enveloppe définie par la crête d'artillerie, répondant à des logiques de défense lointaine (fig. 5.5A-B, 2.17, 2.18A-B). L'analyse combine plans anciens et interprétations spatiales afin de couvrir l'ensemble des douze ouvrages, y compris ceux dont la morphologie est effacée et qui ont été reconstitués vectoriellement à partir de sources planimétriques.

L'objectif est de dégager, à partir de ces configurations, des signatures morphométriques récurrentes, tout en identifiant les exceptions dictées par les contraintes topographiques. Cette approche permet ainsi de qualifier la variabilité géométrique des forts Séré de Rivières autour de Reims et de préparer l'examen détaillé de leurs structures internes.

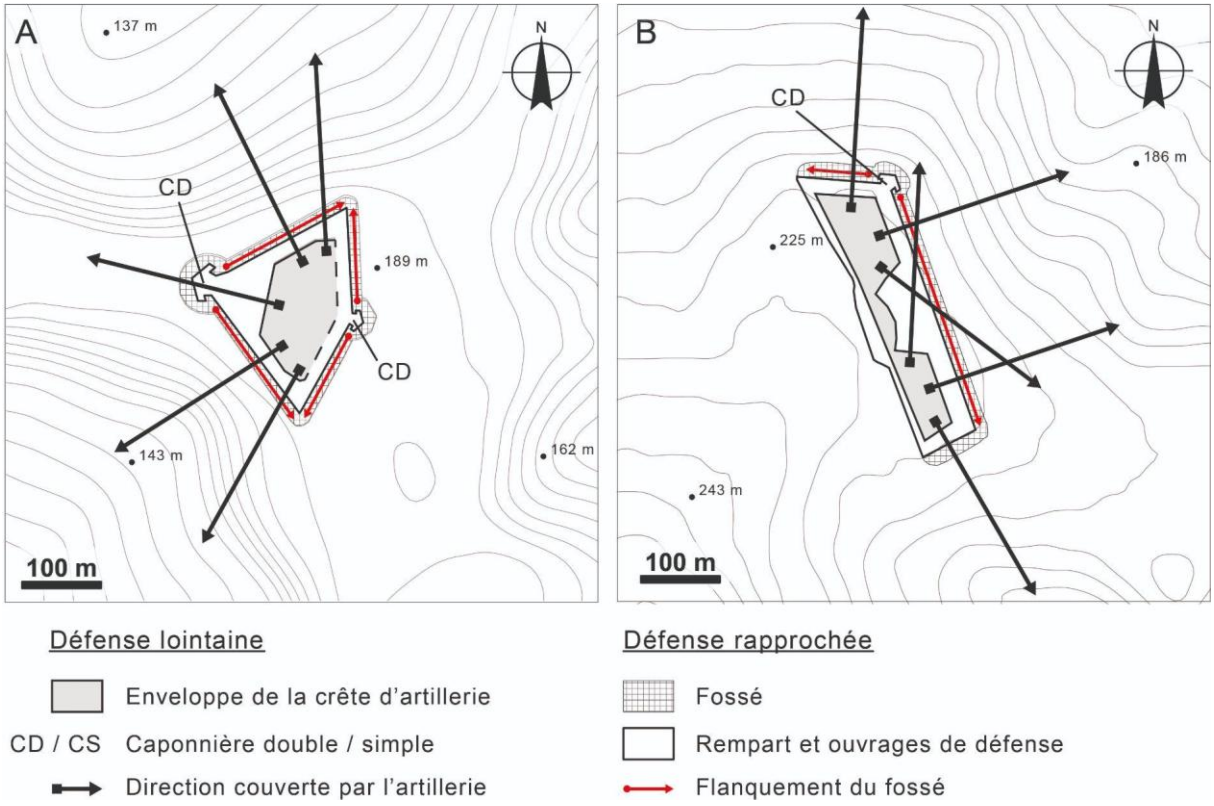


Figure 5.5 : Plan théorique de l'organisation générale d'un fort Séré de Rivières de type 1874. A : Fort de Saint-Thierry ; B : Batterie de Berru.

5.2.1.1. De la géométrie à la fonction militaire : deux lectures de l'enceinte

Deux types de lecture sont possibles pour la description morphologique de l'enceinte : une lecture géométrique, fondée sur la géométrie plane du polygone (nombre d'arêtes, convexité, symétrie), et une lecture fonctionnelle et militaire privilégiée par les spécialistes de la fortification.

Ces deux approches conduisent à la production de typologies distinctes. La lecture géométrique considère les forts de la ceinture de Reims comme globalement pentagonaux, en raison de la présence de cinq arêtes, dont l'un des sommets peut être convexe ou concave (fig. 5.6A-L, tab. 5.2). Seul le fort de Saint-Thierry présente une configuration quadrilatérale (fig. 5.5A, 5.6H). Huit forts sur douze se répartissent selon trois motifs géométriques dominants :

- (i) le pentagone convexe à base longue, à flancs courts et arêtes frontales intermédiaires (forts de Brimont et Witry-lès-Reims, batterie du Cran de Brimont ; fig. 5.6B-D), et (ii) le pentagone concave subtrapézoïdal (fort de Nogent-l'Abbesse, batterie de Loivre, réduit de Chenay ; fig. 5.6A, E, I), caractéristiques des premiers chantiers de construction de 1875 sur les deux buttes-témoins (fig. 3.46, 3.47) ;

- (iii) le pentagone concave subrectangulaire propre à la phase finale de construction (1883-1885, forts de la Pompelle et de Fresne ; fig. 5.6K-L).

Les quatre forts restants, aux formes singulières, sont construits entre ces deux périodes dans l'intervalle 1876-1881 : la batterie de Berru (pentagone concave subtrapézoïdal rectangle ; fig. 5.5B, 5.6F) et la vigie éponyme (pentagone compact ; fig. 5.6J), le fort de Saint-Thierry (quadrilatère convexe subtriangulaire ; fig. 5.5A, 5.6H), et le fort de Montbré (pentagone convexe dissymétrique ; fig. 5.6G).

À l'inverse, la lecture militaire et fonctionnelle ne s'appuie pas sur la géométrie polygonale mais sur le comptage des saillants (tab. 5.3). Chaque saillant donne généralement lieu à une numérotation qui permet de désigner les faces dans le sens horaire (fig. 5.7), laquelle peut également parfois s'appliquer aux segments de la crête d'artillerie évoquée plus loin.

Dans cette logique, les pentagones convexes sont considérés comme de simples pentagones (*e.g.*, fig. 5.6B-D, G, J), tandis que les pentagones concaves sont interprétés comme des trapèzes ou des rectangles à gorge brisée, en raison du rentrant formé sur la face arrière (fig. 5.6A, E-F, I, K-L). Le fort de Saint-Thierry, traditionnellement qualifié de triangulaire, bien qu'il présente en réalité quatre saillants, constitue un cas particulier (fig. 5.5A, 5.6H).

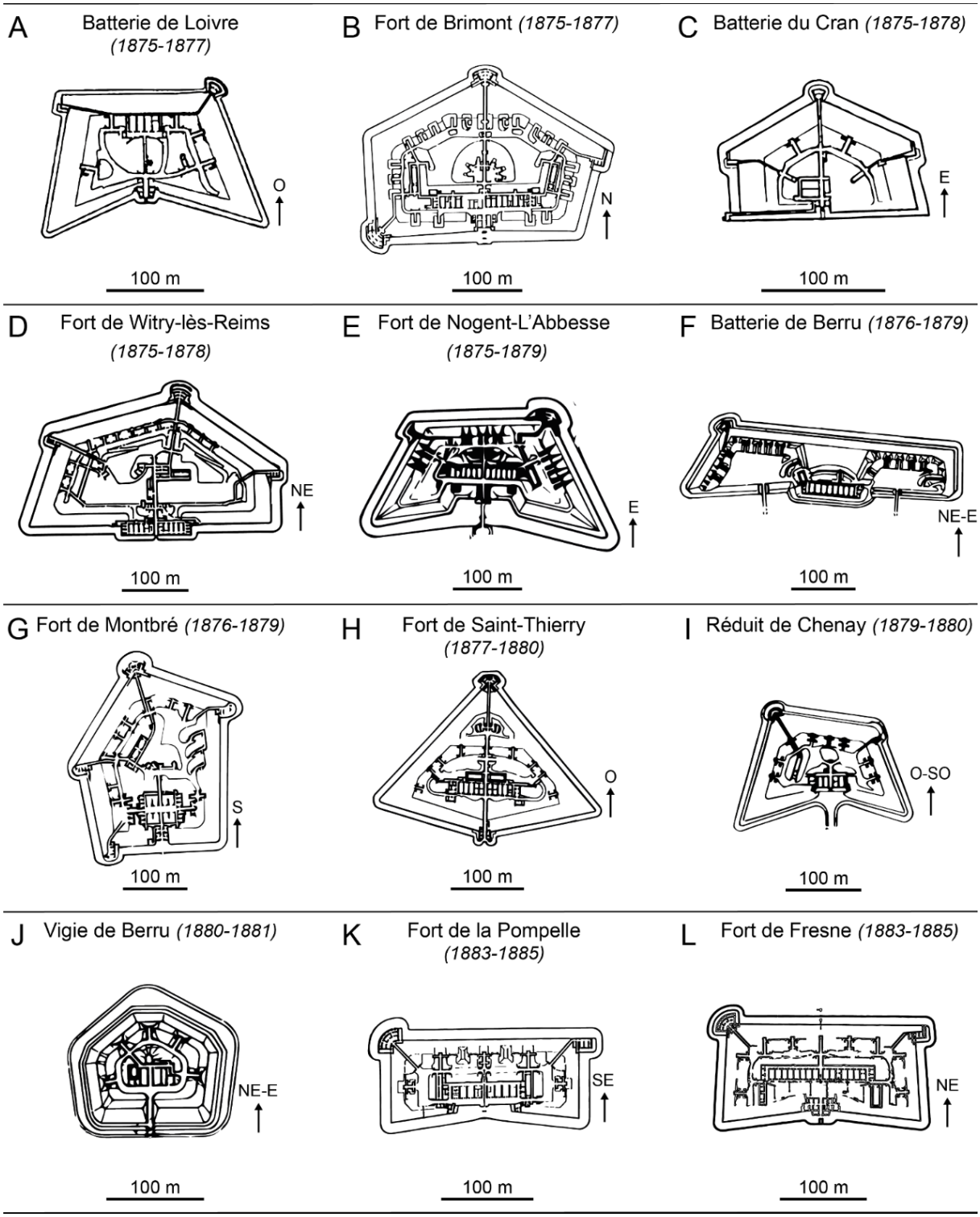


Figure 5.6 : Plans schématiques des forts Séré de Rivières de Reims (les dates de construction apparaissent en italique). A : Batterie de Loivre ; B : Fort de Brimont ; C : Batterie du Cran de Brimont ; D : Fort de Witry-lès-Reims ; E : Fort de Nogent-l'Abbesse ; F : Batterie de Berru ; G : Fort de Montbré ; H : Fort de Saint-Thierry ; I : Réduit de Chenay ; J : Vigie de Berru ; K : Fort de la Pompelle ; L : Fort de Fresne.

Nom	Code	Forme 1	Forme 2	Forme 3	Arêtes	Cap. d	Cap. s
Batterie de Loivre	c	Pentagone	Concave	Subtrapezoïdal	5	1	1
Fort de Brimont	d	Pentagone	Convexe	À flancs longs	5	2	1
Batterie du Cran	e	Pentagone	Convexe	À flancs longs	5	1	2
Fort de Witry-lès-Reims	g	Pentagone	Convexe	À flancs longs	5	1	2
Fort de Nogent-l'Abbesse	j	Pentagone	Concave	Subtrapezoïdal	5	1	1
Batterie de Berru	h	Pentagone	Concave	Subtrapezoïdal	5	1	0
Fort de Montbré	l	Pentagone	Convexe	À base longue	5	1	3
Fort de Saint-Thierry	b	Quadrilatère	Convexe	Subtriangulaire	4	1	0
Réduit de Chenay	a	Pentagone	Concave	Subtrapezoïdal	5	1	1
Vigie de Berru	i	Pentagone	Convexe	Compact	5	0	0
Fort de la Pompelle	k	Pentagone	Concave	Subrectangulaire	5	1	1
Fort de Fresne	f	Pentagone	Concave	Subrectangulaire	5	1	1

Tableau 5.2 : Description morphologique de la forme globale des forts de Reims d'après l'approche géométrique.

Comme l'illustre l'exemple théorique de la figure 2.17, une causalité se manifeste entre le nombre de saillants et le nombre d'ouvrages de flanquement externes visibles au LiDAR (caponnières simples et doubles), selon le principe que tout flanc doit être battu. Si le nombre d'arêtes reste constant entre deux forts d'un point de vue purement géométrique, l'accroissement des saillants multiplie en revanche les ruptures à couvrir par le feu en appelant à l'implantation de dispositifs défensifs eux-mêmes saillants. Les forts à plan pentagonal convexe présentent ainsi généralement au moins trois caponnières, à l'exception de la vigie de Berru, dépourvue d'organes de défense morphologiquement visibles, contre deux dans les configurations trapézoïdales et rectangulaires à gorge rentrante (tab. 5.3 ; fig. 5.6A-L). Les deux cas présentés sur la figure 5.5A-B dérogent également à ce schéma. Au fort de Saint-Thierry, la défense de la gorge est assurée par une caponnière de gorge (ou « à oreilles de chat ») placée sous le corps d'entrée, non comptabilisée dans cette étude comme caponnière double (fig. 5.5A), tandis qu'à la batterie de Berru, aucun ouvrage de défense externe n'existe sur le flanc sud (fig. 5.5B). Dans cette configuration, la défense des rentrants est généralement assurée par des dispositifs plus discrets, tels que des caponnières de gorge ou des structures de flanquement intégrées, difficilement identifiables morphologiquement dans les données LiDAR (*e.g.*, coffres, casemates, batteries à l'air libre, *etc.* ; *cf.* partie 5.2.3.1.2).

Nom	Code	Forme 1	Forme 2	Arêtes	Saillants	Rentrants	Cap. d	Cap. s
Batterie de Loivre	c	Trapèze	Isocèle	5	4	1	1	1
Fort de Brimont	d	Pentagone	/	5	5	0	2	1
Batterie du Cran	e	Pentagone	/	5	5	0	1	2
Fort de Witry-lès-Reims	g	Pentagone	/	5	5	0	1	2
Fort de Nogent-l'Abbesse	j	Trapèze	Isocèle	5	4	1	1	1
Batterie de Berru	h	Trapèze	Rectangle	5	5	1	1	0
Fort de Montbré	l	Pentagone	/	5	5	0	1	3
Fort de Saint-Thierry	b	Triangle	/	4	4	0	1	0
Réduit de Chenay	a	Trapèze	/	5	4	1	1	1
Vigie de Berru	i	Pentagone	/	5	5	0	0	0
Fort de la Pompelle	k	Rectangle	/	5	4	1	1	1
Fort de Fresne	f	Trapèze	Isocèle	5	4	1	1	1

Tableau 5.3 : Description morphologique de la forme globale des forts de Reims d'après une approche militaire et fonctionnelle.

Après l'analyse des formes globales selon des critères géométriques et fonctionnels, il convient d'examiner la concordance entre l'enceinte et la crête d'artillerie, afin de mesurer comment la configuration d'ensemble des forts traduit également les besoins de couverture de l'espace environnant dans le cadre de l'action lointaine.

5.2.1.2. Relations entre l'enceinte et la crête d'artillerie

L'examen comparé de l'enceinte et de la crête d'artillerie permet de distinguer trois configurations principales (fig. 5.8A-L) :

- (i) Les forts possédant une crête d'artillerie épousant le tracé du rempart : batteries de Loivre (fig. 5.8C) et du Cran de Brimont (fig. 5.8D), les forts de Fresne (fig. 5.8F), Witry-lès-Reims (fig. 5.8G) et de la Pompelle (fig. 5.8K), ainsi que la vigie de Berru (fig. 5.8I).

- (ii) Les forts où la crête d'artillerie est localement tronquée afin d'ajouter des tronçons et des directions supplémentaires pour l'artillerie (fig. 5.8A-B, D, H, L). Les cas les plus emblématiques sont le fort de Saint-Thierry et la batterie de Berru avec respectivement 5 et 4 directions de tir pour trois faces constituant l'enceinte du front de tête (fig. 5.5A-B, 5.8B, H).

- (iii) Les forts où la crête d'artillerie épousant le contour d'une courtine participe à l'existence d'un « front bastionné à l'air libre » participant à la défense du front de gorge (*cf.* partie 5.2.3.1.2), comme c'est notamment le cas au réduit de Chenay (fig. 5.8A) et au fort de Nogent-l'Abbesse (fig. 5.8J).

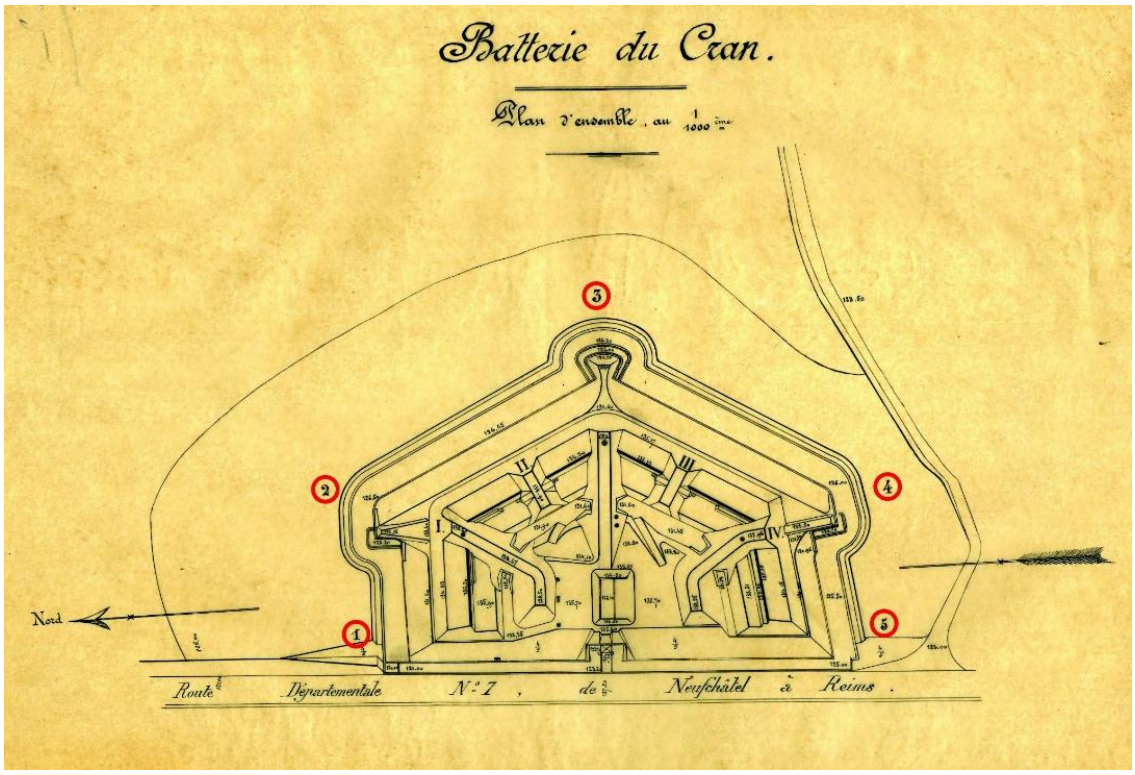


Figure 5.7 : Reproduction du plan d'ensemble au 1/1 000 de la batterie du Cran de Brimont (source : J.P. Batteux). La numérotation des saillants (entourée en rouge) est généralement utilisée pour déterminer les faces 1-2 et 4-5 sur les flancs, et les faces 2-3 et 3-4 sur le front de tête).

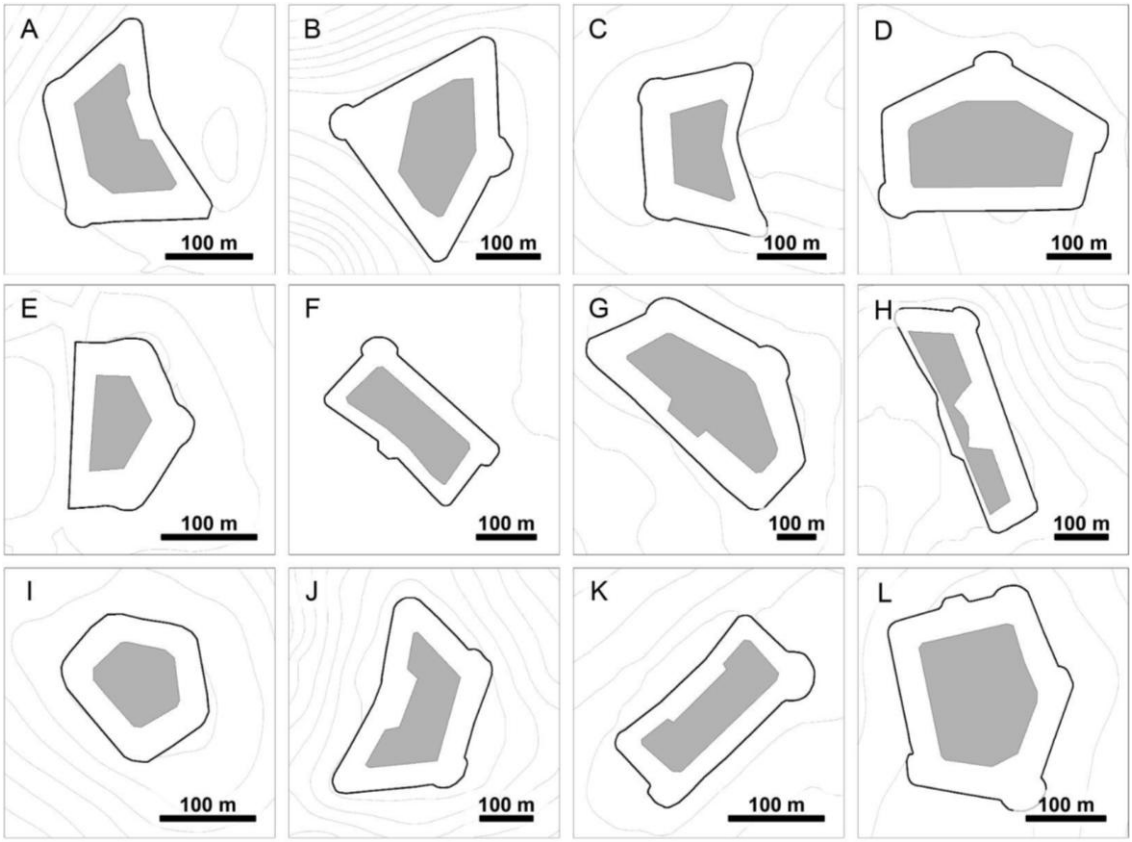


Figure 5.8 : Emprise de l'enceinte (trait noir) et de la crête d'artillerie (polygones gris) des forts de Reims.

5.2.1.3. Profils d'origine

Les archives du Génie conservent certaines coupes topographiques d'époque permettant d'appréhender les profils d'origine, comme l'illustre la figure 5.9A-D pour le fort de Brimont et la batterie de Loivre. Le profil du fort de Brimont court du front de gorge, franchissant le glacis puis le fossé, au glacis du front de tête, en passant par le casernement et la rue du rempart (fig. 5.9A-B). Celui de la batterie de Loivre est tracé transversalement, rejoignant les glacis des flancs en traversant le corps d'entrée central (fig. 5.9C-D). Malgré ces différences de plan et de tracé (pentagones convexe et concave, concordance crête-enceinte différente), ces documents suggèrent l'existence de profils relativement similaires entre ouvrages et conformes aux profils théoriques prescrits dans les instructions du Génie et les cours des écoles de fortification (fig. 2.18B). Cette homogénéité est particulièrement nette pour l'ensemble rempart-fossé, tandis que la partie centrale présente des organisations plus variables.

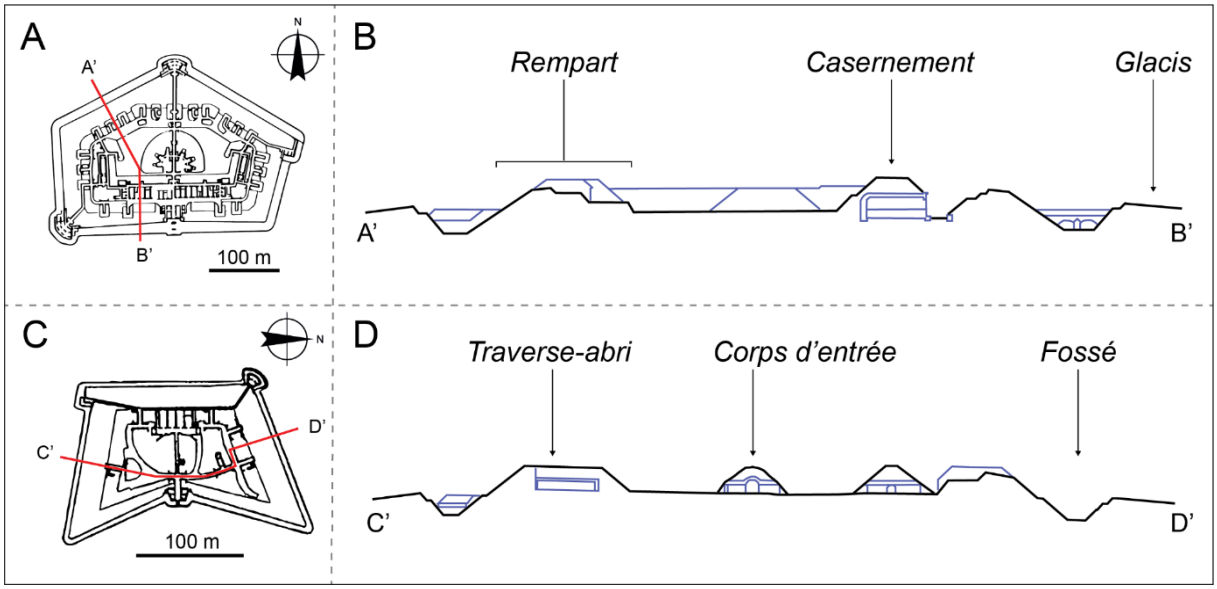


Figure 5.9 : Profils d'origine du fort de Brimont (A-B) et de la batterie de Loivre (C-D). A et C : Plans vectorisés et simplifiés à des fins de représentation ; C-D : Profils topographiques d'origine (sources : fort de Brimont, SHD, GR 4 V T 346 1 ; batterie de Loivre, SHD, GR 2 V 105).

Ces profils d'origine fournissent un cadre de référence sur la géométrie théorique et la standardisation des ouvrages, en particulier pour le couple rempart-fossé. Ils permettent d'établir des repères communs sur les dimensions et les pentes avant d'examiner, de manière plus systématique, les caractéristiques des enceintes des forts. Sur cette base, la section suivante met en œuvre une analyse morphométrique visant à quantifier ces formes et à tester statistiquement les regroupements suggérés par la typologie subjective proposée dans la partie 5.2.1.1.

5.2.1.4. Analyse morphométrique de la forme globale des forts

L'analyse morphométrique croise des mesures issues du LiDAR (surface réelle et convexe, périmètre) avec plusieurs indices de forme (convexité, compacité, allongement) et des variables fonctionnelles comme le nombre de caponnières (fig. 5.10A-D ; tab. 5.4). Elle a pour objectif d'identifier des régularités permettant de classer les forts en ensembles morphologiques et de repérer les singularités liées à la topographie ou à l'histoire des ouvrages. Les résultats sont présentés en suivant une progression allant des dimensions globales aux indices de forme, avant d'être confrontés à des analyses multivariées exploratoires (ACP et CAH).

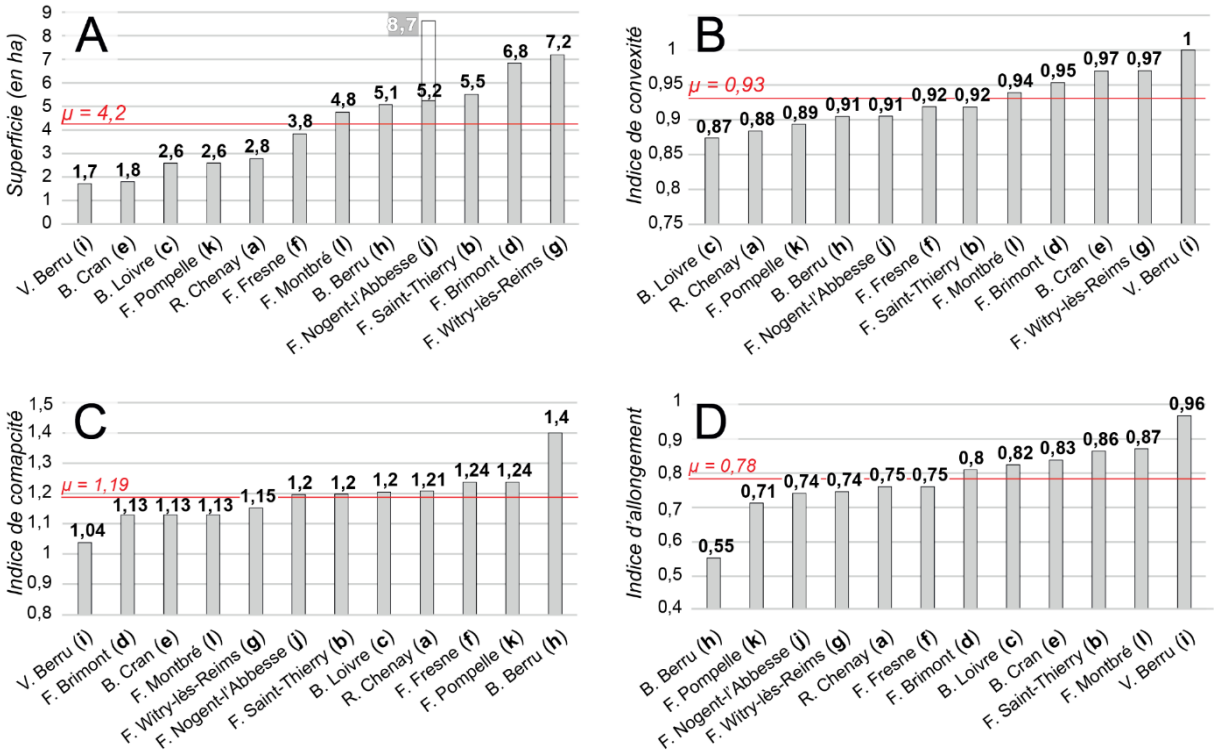


Figure 5.10 : Classement statistique des forts Séré de Rivières de la ceinture de Reims selon quatre variables. A : Superficie (en ha) ; B : Indice de convexité ; C : Indice de compacité ; D : Indice d'allongement.

La surface des forts de la ceinture de Reims varie de 1,7 à 7,2 ha, pour une moyenne établie à 4,2 ha (fig. 5.10A ; tab. 5.4). Deux groupes se distinguent de part et d'autre de cette moyenne. Le premier regroupe des ouvrages de superficie réduite, généralement secondaires (batteries du Cran de Brimont, de Loivre, de Berru et réduit de Chenay), auxquels s'ajoutent les deux derniers forts construits : la Pompelle (2,6 ha) et Fresne (3,8 ha). Ce dernier, bien que proche de la Pompelle par sa forme, est 50 % plus étendu. Cette observation souligne une ambiguïté terminologique : certains ouvrages désignés comme « forts » (Pompelle, Fresne) sont plus petits que des structures qualifiées de « batteries » ou de « réduits » (Chenay, Berru), suggérant que la désignation renvoie davantage à leur statut dans le système (autonomie ou subsidiarité) qu'à leur taille.

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l
1- Na	5	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
2- S (m²)	27 697	55 091	25 805	68 436	17 990	38 272	71 921	50 754	17 103	52 372	25 904	47 518
3- Sc (m²)	31 328	64 607	29 520	71 793	18 527	41 652	74 118	56 075	17 126	57 847	28 986	50 595
4- P (m)	713	997	686	1047	537	858	1 095	1 118	481	971	706	873
5- Ic	0,88	0,92	0,87	0,95	0,97	0,92	0,97	0,91	1,00	0,91	0,89	0,94
6- IcG	1,21	1,20	1,20	1,13	1,13	1,24	1,15	1,40	1,04	1,20	1,24	1,13
7- IaH	0,75	0,86	0,82	0,80	0,83	0,75	0,74	0,55	0,96	0,74	0,71	0,87

Tableau 5.4 : Statistiques morphométriques des forts de Reims. 1 : Nombre d'arêtes ; 2 : Surface (en m²) ; 3 : Surface convexe (en m²) ; 4 : Périmètre (en m) ; 5 : Indice de convexité ; 6 : Indice de compacité de Gravelius ; 7 : Indice d'allongement de Horton. a : Réduit de Chenay ; b : Fort de Saint-Thierry ; c : Batterie de Loivre ; d : Fort de Brimont ; e : Batterie du Cran de Brimont ; f : Fort de Fresne ; g : Fort de Witry-lès-Reims ; h : Batterie de Berru ; i : Vigie de Berru ; j : Fort de Nogent-L'Abbesse ; k : Fort de la Pompelle ; l : Fort de Montbré.

Le second groupe rassemble les principaux forts, dont la surface varie entre 4,8 ha (Montbré) et 7,2 ha (Witry-lès-Reims). Ce dernier égale Brimont en superficie, alors qu'il abrite une garnison deux fois moindre (360 contre 729 hommes) et une artillerie plus réduite (tab. 3.3). La batterie de Berru (5,1 ha), bien qu'annexe à la vigie, s'inscrit paradoxalement dans ce groupe. Le cas du fort de Nogent-l'Abbesse est également singulier : avec 5,2 ha, sa surface est proche de celle de ce dernier ouvrage, mais si l'on y intègre ses trois batteries annexes, il devient la fortification la plus vaste de la ceinture (8,7 ha).

Le périmètre est fortement corrélé à la surface, avec un coefficient de Spearman de $\rho = 0,93$, à l'exception notable de la permutation dans la hiérarchie entre la batterie de Berru et le fort de Montbré. Ces mesures constituent la base pour le calcul des indices de forme, permettant de caractériser plus finement la compacité, la convexité et l'allongement des forts.

L'indice de convexité (fig. 5.10B ; tab. 5.4), défini comme le rapport entre la surface réelle et celle de l'enveloppe convexe (S/Sc), permet de quantifier le caractère concave ou convexe d'une forme. Plus la valeur est proche de 1, plus la forme est convexe. Les ouvrages fortifiés concaves à plans subtrapézoïdaux ou subrectangulaires présentent les valeurs les plus basses, de 0,87 (batterie de Loivre) à 0,92 (forts de Fresne, Saint-Thierry). La moyenne de l'échantillon marque une transition vers un second groupe de formes convexes, dont les indices vont de 0,94 (Montbré) à 1 (vigie de Berru).

Deux indices complémentaires ont été mobilisés : l'indice de compacité de Gravelius et l'indice d'allongement de Horton (fig. 5.10C-D ; tab. 5.4). Tous deux tendent respectivement vers 1 pour les formes les plus compactes d'une part et pour les moins allongées de l'autre. Leur corrélation négative est significative ($\rho = -0,75$, $p < 0,01$), confirmant que les formes allongées sont en général moins compactes. Toutefois, la compacité dépend également de la complexité du contour (rentrants, saillants), ce qui explique que la corrélation soit forte sans être parfaite.

La vigie et la batterie de Berru illustrent cette dissociation entre les deux indices : la première est la plus compacte et la moins allongée du corpus, tandis que la seconde présente l'un des plans les plus étirés. Pour sa part, l'indice de compacité confirme les grandes familles géométriques décrites subjectivement dans le tableau 5.2. Les forts à plan pentagonal concaves subtrapézoïdaux présentent des valeurs entre 1,2 et 1,21, lorsque les subrectangulaires montent à 1,24 et que les plans pentagonaux convexes descendent à 1,13-1,15. Le fort de Saint-Thierry, à plan quadrilatéral subtriangulaire, se distingue avec une valeur intermédiaire (1,2). L'indice d'allongement complète cette lecture en soulignant que les forts pentagonaux convexes sont les moins étirés, à l'exception de celui Witry-lès-Reims (IaH = 0,74). Par ailleurs, l'ouvrage de Loivre, pourtant concave, montre une forme modérément allongée (IaH = 0,8).

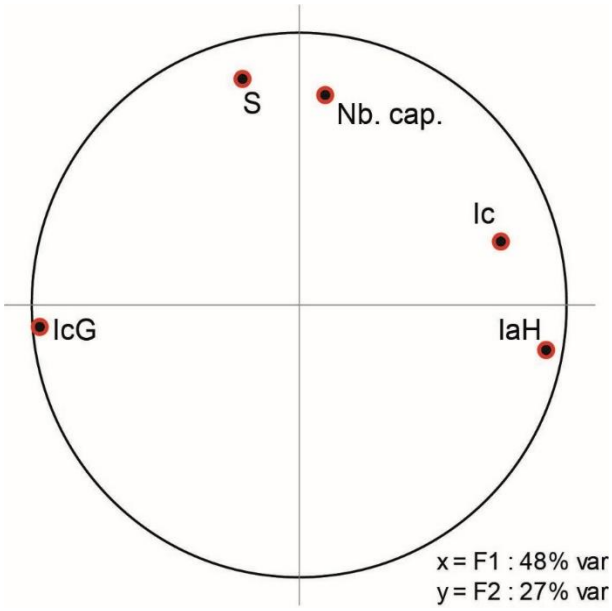


Figure 5.11 : Analyse en composantes principales (ACP) réalisée sur cinq paramètres utilisés pour qualifier la morphologie globale des forts de Reims. Le périmètre n'est pas pris en compte car il est extrêmement corrélé avec la surface. IaH : Indice d'allongement d'Horton ; Ic : Indice de convexité ; IcG : Indice de compacité de Gravelius ; Nb cap : Nombre de caponnières ; S : Surface.

L'ACP confirme la corrélation négative entre compacité et allongement, ainsi qu'entre compacité et convexité (fig. 5.11), plus une forme étant concave, plus elle s'éloigne du cercle théorique servant de référence à l'indice de convexité. L'allongement et la convexité présentent, quant à eux, une corrélation positive modérée. En revanche, la surface et le nombre de caponnières, orthogonaux à ces dimensions, ne sont pas corrélés aux indices morphométriques, mais montrent une forte corrélation entre eux.

Pour objectiver la typologie géométrique (tab. 5.2), deux classifications ascendantes hiérarchiques (CAH) ont été réalisées avec quatre et deux variables indépendamment de la surface et du nombre d'arêtes (fig. 5.12A-B, tab. 5.5).

La première utilise les variables morphométriques de l'IaH, de l'IcG, de l'Ic, et du nombre de caponnières et distingue deux ensembles (fig. 5.12A ; tab. 5.5) : les forts concaves et le fort de Saint-Thierry d'un côté (J1-J2), les forts pentagonaux convexes de l'autre (J3-J4). La vigie de Berru (J1) s'individualise par sa forte compacité (1,04), sa convexité parfaite (1), son faible allongement (0,96) et l'absence de caponnières. Sa batterie annexe (J3) lui est opposée sur les indices de compacité (1,4) et d'allongement (0,55) et se distingue de manière plus relative sur l'indice de convexité (0,91) et le nombre de caponnières (1).

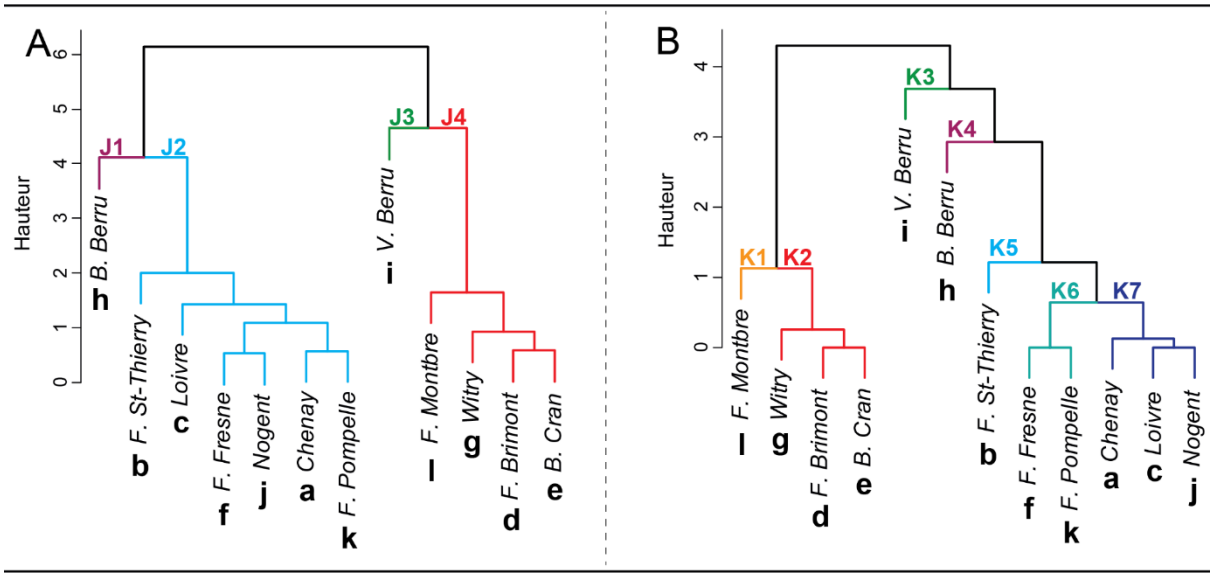


Figure 5.12 : Classification ascendante hiérarchique (CAH) relative aux paramètres morphométriques des forts de Reims. A : CAH à quatre variables (indice de compacité de Gravelius, indice d'allongement de Horton, indice de convexité, nombre de caponnières) ; B : CAH à deux variables (indice de compacité de Gravelius, nombre de caponnières).

Nom	Code	Forme 1	Forme 2	Forme 3	CAH1	CAH2	Nc	Ic	IcG	IaH
Batterie de Berru	h	Pentagone	Concave	Subtrapezoïdal	J1	K4	1	*0,91*	*1,4*	*0,55*
Fort de Saint-Thierry	b	Quadrilatère	Convexe	Subtriangulaire	J2	K5	1	*0,85*	*1,2*	*0,86*
Batterie de Loivre	c	Pentagone	Concave	Subtrapezoïdal	J2	K7	2	*0,87*	*1,2*	*0,82*
Fort de Fresne	f	Pentagone	Concave	Subrectangulaire	J2	K6	2	*0,92*	*1,24*	*0,75*
Fort de Nogent-l'Abbesse	j	Pentagone	Concave	Subtrapezoïdal	J2	K7	2	*0,91*	*1,2*	*0,74*
Réduit de Chenay	a	Pentagone	Concave	Subtrapezoïdal	J2	K7	2	*0,88*	*1,21*	*0,75*
Fort de la Pompelle	k	Pentagone	Concave	Subrectangulaire	J2	K6	2	*0,89*	*1,24*	*0,71*
Vigie de Berru	i	Pentagone	Convexe	Compact	J3	K3	0	*1*	*1,04*	*0,96*
Fort de Montbré	l	Pentagone	Convexe	À base longue	J4	K1	4	*0,94*	*1,13*	*0,87*
Fort de Witry-lès-Reims	g	Pentagone	Convexe	À flancs longs	J4	K2	3	*0,97*	*1,15*	*0,74*
Fort de Brimont	d	Pentagone	Convexe	À flancs longs	J4	K2	3	*0,95*	*1,13*	*0,8*
Batterie du Cran	e	Pentagone	Convexe	À flancs longs	J4	K2	3	*0,97*	*1,13*	*0,83*

Tableau 5.5 : Description géométrique de la forme globale des forts de Reims par rapport aux statistiques morphométriques.

Les groupes J2 et J4 rassemblent les autres forts. Le groupe J2 se distingue par une convexité inférieure à la moyenne (Ic < 0,93), une compacité moyenne à faible (IcG > 1,19), un allongement généralement marqué (IaH < 0,78), à l'exception des forts de Saint-Thierry et Loivre, et la présence d'une à deux caponnières conventionnelles (simples ou doubles). Le groupe J4, à l'inverse, présente une convexité plus élevée (Ic > 0,93), une compacité supérieure (IcG < 1,19), un allongement plus faible (sauf pour le fort de Witry-lès-Reims ; IaH > 0,78) et un nombre de caponnières plus élevé (trois à quatre).

La seconde CAH cible uniquement la compacité et les caponnières (IcG et nombre de caponnières ; fig. 5.12B, tab. 5.5), variables permettant une discrimination statistique

s'approchant le plus de la typologie subjective issue de l'observation des plans. Elle isole sept groupes morphologiques : K1 (fort de Montbré ; 1,13 ; 4 caponnières), K2 (ouvrages de Witry-lès-Reims, de Brimont, et du Cran de Brimont ; 1,13-1,15 ; 3 caponnières), K3 (vigie de Berru ; 1,04 ; 0 caponnière), K4 (batterie de Berru ; 1,4 ; 1 caponnière), K5 (fort de Saint-Thierry ; 1,2 ; 1 caponnière), K6 (forts de Fresne et de la Pompelle ; 1,24 ; 2 caponnières) et K7 (fort de Nogent-l'Abbesse, ouvrages de Chenay et Loivre ; 1,2-1,21 ; 2 caponnières).

Cette analyse morphométrique permet ainsi d'objectiver la forme globale des forts et de valider les regroupements issus de la lecture typomorphologique. La section suivante mobilise directement les données LiDAR pour décrire la morphologie actuelle et visible des polémoformes à l'échelle de chaque fort.

5.2.2. Approche topographique LiDAR (échelle du fort)

Le LiDAR constitue l'outil central pour décrire la morphologie actuelle des forts, s'étendant sur près de 50 ha, et inventorier les polémoformes encore visibles. Il permet d'évaluer leur intégrité morphologique et de confronter les configurations théoriques à l'état topographique présent. Cette sous-partie est organisée en trois sections, présentant les polémoformes dans leurs dimensions planimétrique, altimétrique et volumétrique afin de caractériser les polémoformes à l'échelle générale du fort, avant d'aborder l'analyse des structures internes dans la section suivante.

5.2.2.1. Planimétrie et rugosité

Les MNT LiDAR et les traitements dérivés (pente, LRM, TRI) offrent une vue synoptique des douze sites fortifiés de la ceinture de Reims (fig. 5.13A-L). L'analyse statistique bivariée des indices de rugosité du terrain ($r = 0{,}961$) confirme les contrastes de lisibilité morphologique observés visuellement et met en évidence deux ensembles distincts, chacun regroupant des valeurs concentrées et une valeur extrême individualisée (vigie de Berru et fort de Montbré).

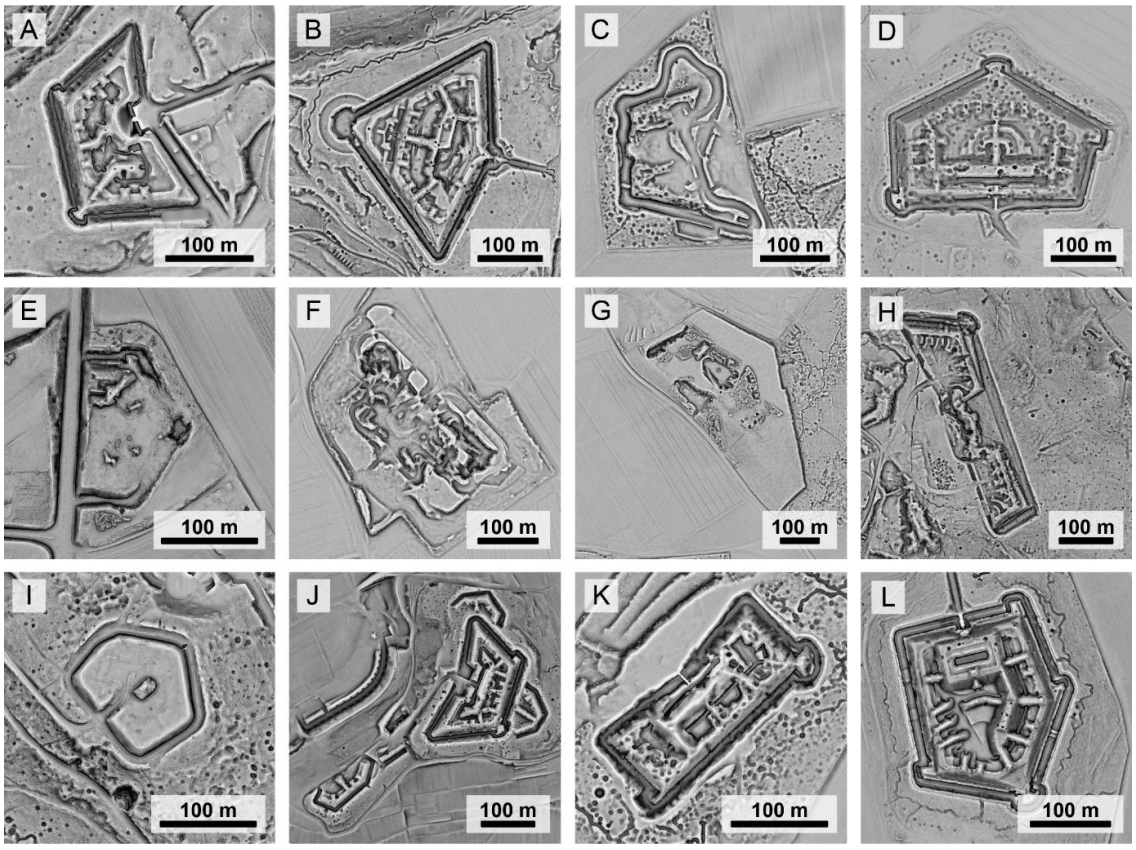


Figure 5.13 : Forts de la ceinture de Reims (MNT LIDAR HD traité visuellement, indice de pente et LRM en transparence). A : Réduit de Chenay ; B : Fort de Saint-Thierry ; C : Batterie de Loivre ; D : Fort de Brimont ; E : Batterie du Cran de Brimont ; F : Fort de Fresne ; G : Fort de Witry-lès-Reims ; H : Batterie de Berru ; I : Vigie de Berru ; J : Fort de Nogent-l'Abbesse ; K : Fort de la Pompelle ; L : Fort de Montbré.

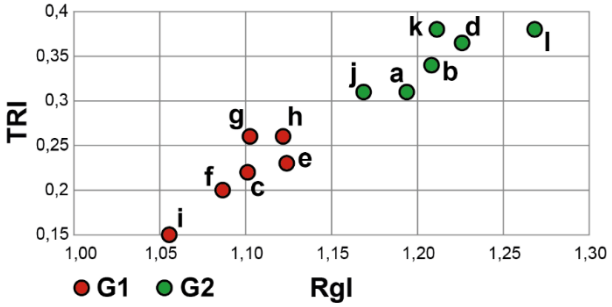


Figure 5.14 : Corrélation entre les valeurs de rugosité de terrain de chaque fort calculées selon deux méthodes (TRI ; RgI). Chaque point représente une paire de valeurs, montrant la tendance linéaire positive entre les deux variables calculées. G1 : Groupe 1 ; G2 : Groupe 2 ; a : Réduit de Chenay ; b : Fort de Saint-Thierry ; c : Batterie de Loivre ; d : Fort de Brimont ; e : Batterie du Cran de Brimont ; f : Fort de Fresne ; g : Fort de Witry-lès-Reims ; h : Batterie de Berru ; i : Vigie de Berru ; j : Fort de Nogent-l'Abbesse ; k : Fort de la Pompelle ; l : Fort de Montbré.

Le premier groupe (G1), associé aux indices les plus faibles (TRI ≤ 0,26 ; RgI ≤ 1,12 ; fig. 5.14), comprend la batterie de Berru (fig. 5.13H), les ouvrages de Fresne (fig. 5.13F), de Loivre (fig. 5.13C), de Witry-lès-Reims (fig. 5.13G), du Cran de Brimont (fig. 5.13E) et la vigie de Berru (fig. 5.13I). Sur les images dérivées du MNT LiDAR, l'organisation interne de ces ouvrages est presque complètement effacée, voire totalement imperceptible. La batterie de Berru constitue une exception partielle, car certaines caractéristiques spécifiques, telles que l'emplacement initial des traverses-abris et de la caponnière double (dont le puits d'aération est encore accessible) ou le fossé périphérique, restent identifiables.

Le deuxième groupe (G2) rassemble les forts ayant les indices de rugosité de terrain les plus élevés (TRI ≥ 0,31 ; RgI ≥ 1,17 ; fig. 5.14). Ces ouvrages conservent une organisation interne en grande partie voire totalement interprétable grâce aux morphologies révélées par les traitements de visualisation du MNT : réduit de Chenay (fig. 5.13A), forts de Saint-Thierry (fig. 5.13B), Brimont (fig. 5.13D), Nogent-l'Abbesse (fig. 5.13J), la Pompelle (fig. 5.13K) et Montbré (fig. 5.13L ; *cf.* partie 5.2.3.1).

Cette lecture planimétrique, visuelle et quantitative fournit une première hiérarchisation de l'intégrité morphologique des forts. Les caractéristiques altitudinales et les profils topographiques des ouvrages, extraites du MNT LiDAR, permettent de quantifier les variations de relief et de parfaire l'objectivation des caractéristiques morphologiques des polémoformes.

5.2.2.2. Altimétrie et pentes

L'analyse altimétrique réalisée à partir du MNT permet d'extraire, pour chaque ouvrage, les altitudes minimales et maximales, d'où découle le dénivelé interne théorique, ainsi que l'altitude moyenne (tab. 5.6). Cette valeur de dénivelé, qui traduit l'ampleur des terrassements, est envisagée comme un indicateur potentiel de l'intégrité morphologique des forts. La distribution des valeurs entre chaque fort est examinée en fonction de la superficie des ouvrages afin de détecter d'éventuelles régularités. Les coupes transversales standardisées restituent ensuite la morphologie en profil du couple rempart-fossé, en

opposant des sites peu altérés à des sites fortement remaniés, avant d'aborder la quantification de l'effacement par l'analyse statistique des pentes du fossé.

Fortification	Code	TRI	RgI	Alt.^{moy}	Déniv.	Pente^{moy}	Pente^{med}
Vigie de Berru	i	0,15	1,06	264 m	11 m	14,7	9,5
Fort de Fresne	f	0,2	1,09	114 m	15 m	14,2	9,5
Batterie de Loivre	c	0,22	1,10	112 m	13 m	15,2	8,5
Fort de Witry-lès-Reims	g	0,26	1,10	182 m	18 m	9,4	4,5
Batterie de Berru	h	0,26	1,12	228 m	21 m	18,5	16,5
Batterie du Cran de Brimont	e	0,23	1,12	130 m	15 m	19,6	14,5
Fort de Nogent-l'Abbesse	j	0,31	1,17	209 m	22 m	22,7	23,5
Redoute de Chenay	a	0,31	1,19	206 m	14 m	24,3	25,5
Fort de Saint-Thierry	b	0,34	1,21	192 m	20 m	27,7	29,5
Fort de la Pompelle	k	0,38	1,21	122 m	17 m	27,3	28,5
Fort de Brimont	d	0,365	1,23	163 m	20 m	27,1	27,5
Fort de Montbré	l	0,38	1,27	169 m	22 m	26	23,5

Tableau 5.6 : Statistiques relatives aux forts Séré de Rivières extraites des données LiDAR. Alt : Altitude ; Déniv : Dénivelé théorique ; Moy : moyenne ; Med : médiane ; RgI : Indice de rugosité global ; TRI : Indice de rugosité de terrain.

5.2.2.2.1. Dénivelé théorique

Les dénivelés varient de 11 m pour la vigie de Berru à 22 m pour le fort de Montbré, pour une moyenne de 17,3 m. La distribution suit globalement celle des superficies, avec une corrélation significative observée (r = 0,73). Les forts les plus vastes (≥ 4,8 ha) présentent des dénivelés supérieurs ou égaux à 18 m, tandis que les plus petits affichent des valeurs inférieures ou égales à 17 m (fig. 5.10A ; tab. 5.4, 5.6). Le dénivelé élevé, mesuré pour les quatre principaux forts bien conservés (20 à 22 m), suggère une tendance à la standardisation des reliefs des forts Séré de Rivières de la ceinture de Reims. Ces résultats doivent cependant être interprétés avec précaution, car l'érosion et le comblement accumulés depuis un siècle et demi atténuent les contrastes altimétriques et masquent partiellement les reliefs originels (*cf.* partie 6.1.3). Le cas du réduit de Chenay, dont le dénivelé limité (14 m) contraste avec celui des principaux forts pourtant peu effacés, tend néanmoins à conforter cette relation (tab. 5.6).

5.2.2.2.2. Profils topographiques

Les coupes transversales extraites du MNT LiDAR mettent en évidence la structuration morphologique du couple rempart-fossé, véritable colonne vertébrale des défenses rapprochées et lointaines (fig. 2.18A-B). Elles peuvent être directement confrontées au classement établi précédemment d'après les valeurs de rugosité (fig. 5.14 ; tab. 5.6). La figure 5.15A-L montre que dans les forts de la série G1, le profil originel est en grande partie

brouillé (fig. 5.15C, E-G, I). Seuls persistent quelques éléments relictuels, notamment la pente douce du glacis et un fossé résiduel plus ou moins lisible. Même lorsque le remaniement topographique a été intense, comme à la batterie de Loivre (fig. 5.15C), au fort de Fresne (fig. 5.15F) ou à la vigie de Berru (fig. 5.15I), le contraste entre l'ensemble glacis-fossé et le massif de terre du rempart subsiste, traduisant la robustesse morphologique de ces terrassements malgré l'action de l'érosion.

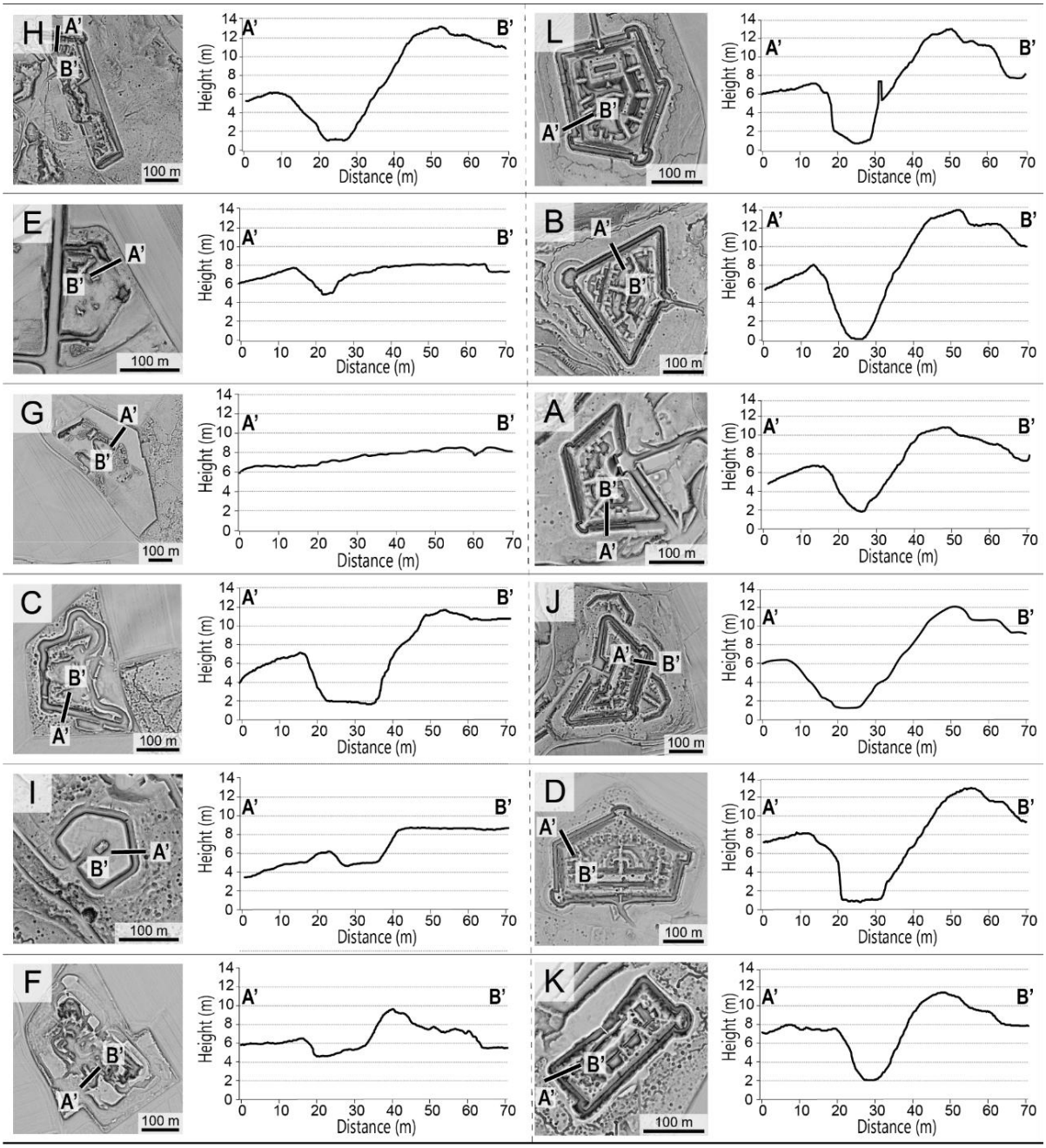


Figure 5.15 : Coupes topographiques du rempart et du fossé (en place ou emplacement théorique) des forts Séré de Rivières de la ceinture de Reims. Les ouvrages sont classés subjectivement en fonction de leur lisibilité morphologique. A : Réduit de Chenay ; B : Fort de Saint-Thierry ; C : Batterie de Loivre ; D : Fort de Brimont ; E : Batterie du Cran de Brimont ; F : Fort de Fresne ; G : Fort de Witry-lès-Reims ; H : Batterie de Berru ; I : Vigie de Berru ; J : Fort de Nogent-l'Abbesse ; K : Fort de la Pompelle ; L : Fort de Montbré.

À l'inverse, dans la série G2, les forts présentent un profil homogène compris entre 12 et 14 m de dénivelé, à l'exception du réduit de Chenay où il se limite à 10 m (fig. 5.15A-B, D, H, J-L). La succession typique des morphologies relatives aux forts de type 1874 ressort nettement, avec de gauche à droite : le glacis en pente douce, le fossé aux fonds plus ou moins plats, le talus extérieur et le parapet composé de la plongée et du terre-plein destiné à l'artillerie. À ce titre, le fort de Brimont illustre particulièrement bien la correspondance entre la morphologie observée et les prescriptions techniques théoriques (fig. 5.16A-C).

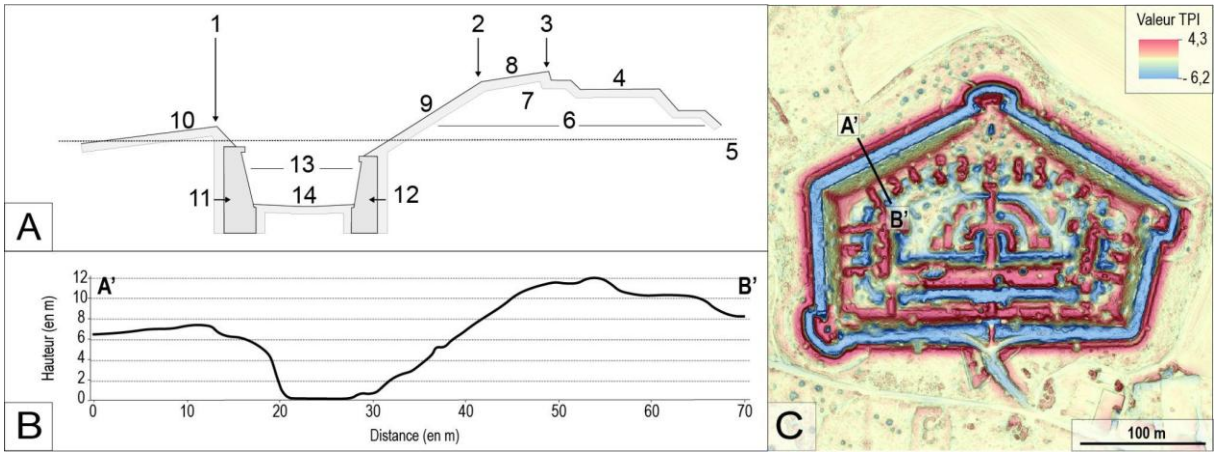


Figure 5.16 : Morphologies du rempart du fort de Brimont (en coupe et en plan). A : Profil théorique du rempart d'une fortification Séré de Rivières de type 1874 (d'après Guillot, 1949) ; B : Coupe topographique du rempart du front de tête du fort de Brimont réalisé à partir des données microtopographiques issues du LiDAR ; C : Traitement de visualisation TPI dérivé du MNT LiDAR (IMPACT 14-18, GEGENA). 1 : Crête du chemin couvert ; 2. Crête extérieure ; 3 : Crête de feu (crête intérieure) ; 4 : Terre-plein ; 5 : Sol naturel ; 6 : Rempart ; 7 : Parapet ; 8 : Plongée ; 9 : Talus extérieur ; 10 : Glacis ; 11 : Contrescarpe ; 12 : Escarpe ; 13 : Fossé ; 14 : Position de la cunette.

Les profils LiDAR corroborent la pertinence du découpage entre ouvrages fortement altérés (G1) et lisibles (G2), tout en confirmant visuellement cette robustesse de l'ensemble rempart-fossé. Pour affiner cette lecture qualitative et compléter l'indicateur global de rugosité, l'étape suivante consiste à analyser statistiquement les valeurs de pente mesurées sur la zone périphérique des forts (de la crête extérieure à la crête du chemin couvert) afin de préciser le degré de préservation des polémoformes Séré de Rivières et d'en identifier les variations (*cf.* partie 4.3.3.4.2).

5.2.2.2.3. Distribution des valeurs de pente de la zone périphérique

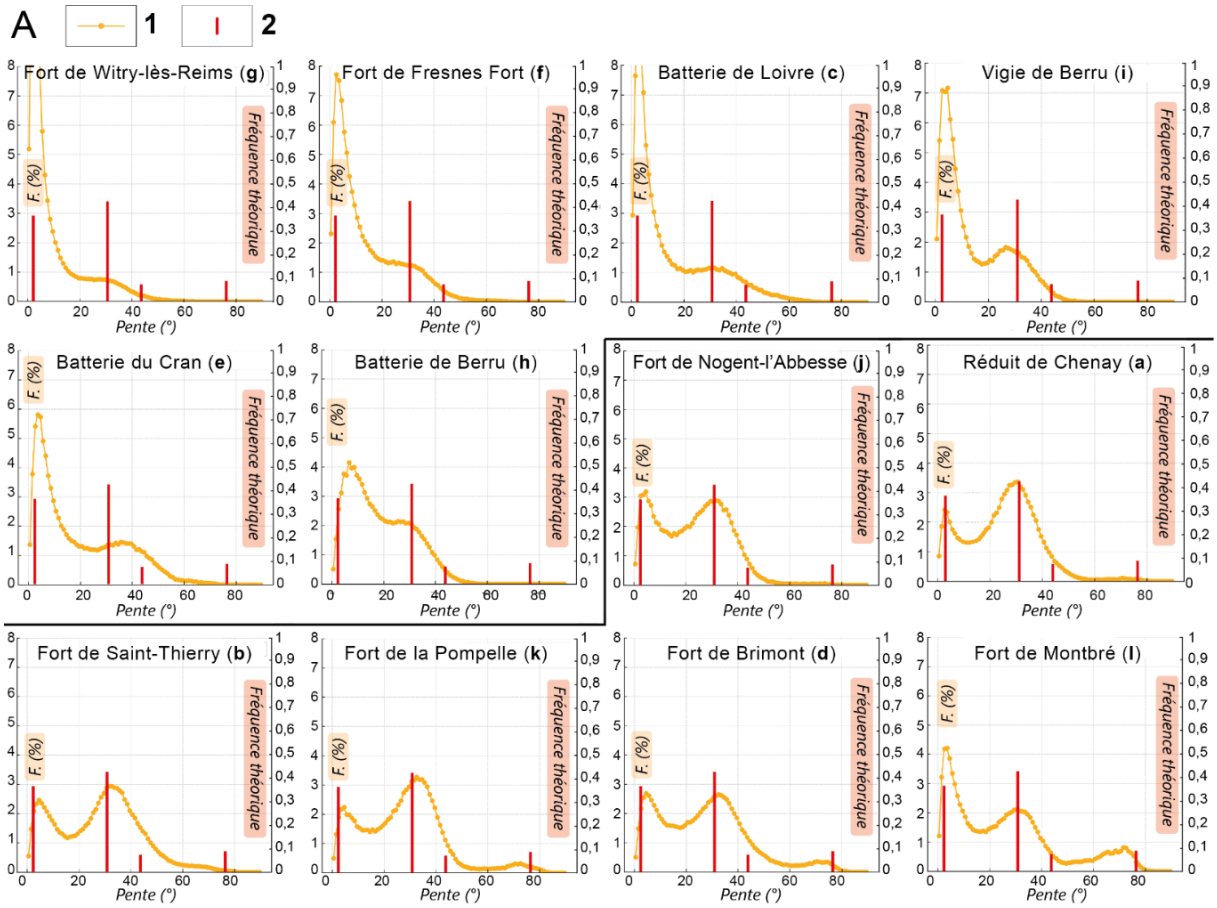
En l'occurrence, l'utilisation de statistiques descriptives sur les valeurs de pente de la zone périphérique des forts corrobore également la répartition discriminante, en deux groupes, obtenue à partir des indices de rugosité du terrain (fig. 5.17A-B ; fig. 5.14 ; tab. 5.6). Les ouvrages de la série G1 se caractérisent par une médiane (Med) et une moyenne (Moy) inférieures ou égales respectivement à 16,5 et 19,6° (forts c, e, f, g, h, i). La distribution statistique est bimodale, avec un premier pic (P1) compris entre 2 et 7°, associé à une

fréquence relative élevée (F ≥ 4,16 %), une étendue (E) comprise entre 15 et 20 et une fréquence cumulée croissante (FCC) comprise entre 55,9 et 84,4 %. Le second pic (P2), situé entre 26 et 40° , présente une fréquence plus modérée (F ≤ 2,2 %), une E entre 20 et 33 et une FCC comprise entre 11,8 et 32,6 %. À l'inverse, la série G2 regroupe des polémoformes dont la Me et la Moy des valeurs de pente sont supérieures ou égales respectivement à 23,5 et 22,7° (forts a, b, d, j, k, l). La distribution statistique comporte trois modes. P1 est situé entre 2 et 5°, avec une F comprise entre 2,2 % et 4,2 %, une E entre 11 et 14 et une FCC entre 18,7 % et 36,4 %. P2 (30-33°) présente une F de 2,7 % à 3,5 %, une E entre 29 et 38 et une FCC entre 42,5 % et 73,9 %. De plus, un troisième pic (P3) apparaît en fin de distribution (66-73°), parfois statistiquement imperceptible, ne dépassant jamais 0,5 % en F, avec une E comprise entre 14 et 22, pour une FCC de 0,5 % à 10,8 %.

La comparaison avec le diagramme de distribution établi à partir du profil théorique d'une fortification Séré de Rivières (fig. 2.18B ; Guillot, 1949) permet d'associer les pics identifiés aux valeurs de pente théoriques du fond du fossé (M1), du talus extérieur (M2) et des murs de soutènement du fossé (M4). En revanche, les valeurs correspondant au chemin couvert en revers du glacis (M3) semblent statistiquement imperceptibles. Les valeurs de P1 sont centrées sur les intervalles 2-7° (G1) et 2-5° (G2), coïncidant avec M1 (2,8°). À l'exception de quatre forts, où les pics sont situés entre 2 et 3° (a, c, f, g), toutes les autres morphologies présentent des pics décalés vers des valeurs plus élevées, entre 3 et 7°. En revanche, les deux groupes diffèrent par leur FCC, G1 ayant une FCC supérieure à la FCC théorique (G1 FCC > 38 %) et G2 une FCC inférieure (G2 FCC < 38 %). La même logique s'applique aux valeurs de P2, centrées entre 26 et 40° (G1), puis 30 et 33° (G2), qui recoupent M2 (32,2° ; FCC = 44 %), mais diffèrent par des FCC plus faibles pour G1 et généralement plus élevées pour G2. L'un des principaux facteurs discriminants est l'absence de P3 dans G1. Dans G2, les valeurs de pente de P3 (66-73°), bien que plus faibles, correspondent à M4 (77° ; FCC = 9,5 %), avec des FCC presque toujours bien inférieure, à l'exception du fort de Montbré (l).

Après l'analyse planimétrique et altimétrique des forts, la section suivante aborde l'évaluation volumétrique des terrassements. Cette approche vise à estimer l'ampleur des matériaux déplacés lors de la construction et à comparer l'intensité des travaux entre ouvrages.

A



B

	g	f	c	i	e	h	j	a	b	k	d	l
Mode 1	[2-3[	[2-3[	[2-3[	[3-4[	[3-4[	[6-7[	[4-5[	[2-3[	[4-5[	[4-5[	[4-5[	[3-4[
Fréquence	15	7,7	9,5	7	5,8	4,2	3,2	2,7	2,5	2,2	2,7	4,2
Étendue	20	16	16	15	17	19	12	11	13	12	14	14
Freq. cumul.	84,4	65,9	65	61,2	54,9	56,6	28	18,7	23,7	20,3	27,5	36,4
Mode 2	[31-32[	[31-32[	[31-32[	[26-27[	[39-40[	[27-28[	[31-32[	[30-31[	[32-33[	[32-33[	[32-33[	[31-32[
Fréquence	0,7	1,2	1,2	1,8	1,5	2,1	2,9	3,5	3	3,3	2,7	2,9
Étendue	20	23	33	30	30	32	29	38	38	37	32	31
Freq. cumul.	11,8	22,1	25,15	29,4	30,7	32,6	52,3	73,9	65,2	64,6	54,2	42,5
Mode 3	/	/	/	/	/	/	[68-69[	[70-71[	[66-67[	[72-73[	[72-73[	[71-72[
Fréquence	/	/	/	/	/	/	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	0,1
Étendue	/	/	/	/	/	/	14	17	14	17	15	22
Freq. cumul.	/	/	/	/	/	/	0,5	1,2	1,8	3,3	3,8	10,8

Figure 5.17 : Synthèse des diagrammes de distribution des valeurs de pente des forts de Reims (rempart et fossé). A : Diagramme de distribution des valeurs de pente ; B : Statistiques associées. 1. Fréquence relative ; 2. Valeur de pente théorique (fig. 2.18B).

5.2.2.3. Volumétrie

Au-delà des formes planimétriques et des profils, l'évaluation volumétrique des terrassements (excavations, remblais, fossés) permet d'apprécier l'ampleur des travaux mobilisés. Elle replace les forts dans une logique d'aménagement massif du relief et fournit une base de comparaison de l'intensité des interventions entre sites.

La figure 5.18A-D présente une rare exception documentaire pour la ceinture fortifiée de Reims, provenant d'un « *recueil des croquis d'exécution des principaux ouvrages de défense en cours de construction* » de 1877 (Ministère de la Guerre, 1877). Ce document unique représente le site de la batterie de Loivre avec des courbes de niveau (fig. 5.18A), permettant de modéliser sous SIG le relief avant (fig. 5.18B) et après le début des travaux (fig. 5.18C). Dans la vignette C, l'altitude précise de la batterie n'est pas représentée, car le plan n'en fournit que des cotes d'altitudes ponctuelles, non prises en compte dans ce modèle. L'altitude indiquée dans l'emprise de l'ouvrage, extrapolée par rapport aux courbes de niveau environnantes, peut ainsi être considérée comme se rapprochant davantage d'une surface terrassée avant le creusement du fossé et la construction du fort. La comparaison de ces deux modèles montre que l'implantation de cette fortification a élargi la partie sommitale de la croupe de craie et créé des escarpements périphériques. Le calcul de volumes bouleversés est difficilement réalisable sur la seule base de ce plan d'époque et du fait du remaniement topographique récent lié à un circuit automobile révélé par l'acquisition LiDAR de 2015 (fig. 5.18D).

Afin d'en obtenir une estimation pour les forts de Reims, une comparaison sous SIG a été effectuée entre une topographie initiale théorique reconstituée et la topographie actuelle des polémoformes les mieux conservées issue du LIDAR HD (forts de la série G2 et batterie de Berru ; *cf.* partie 4.3.3.4.3).

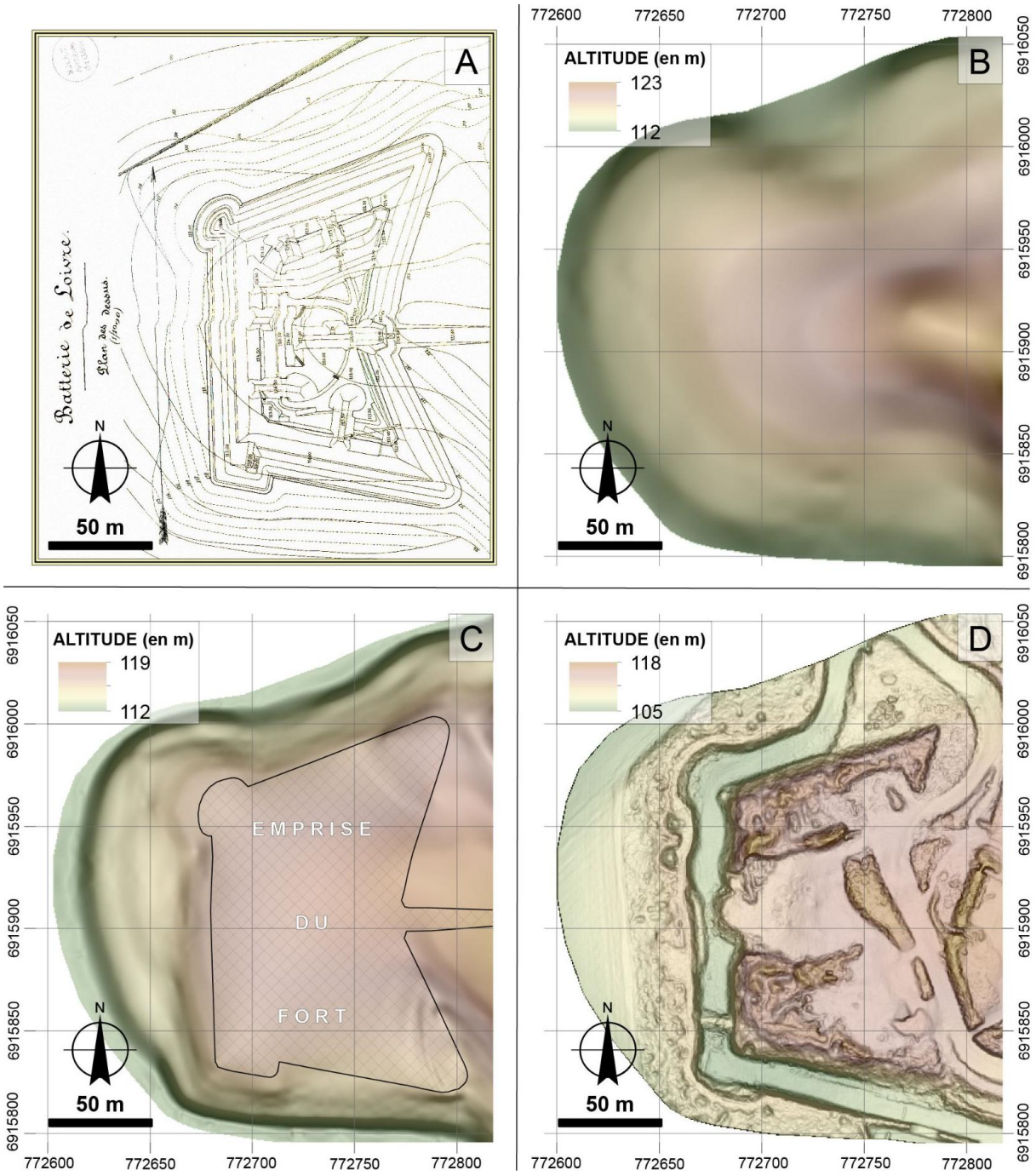
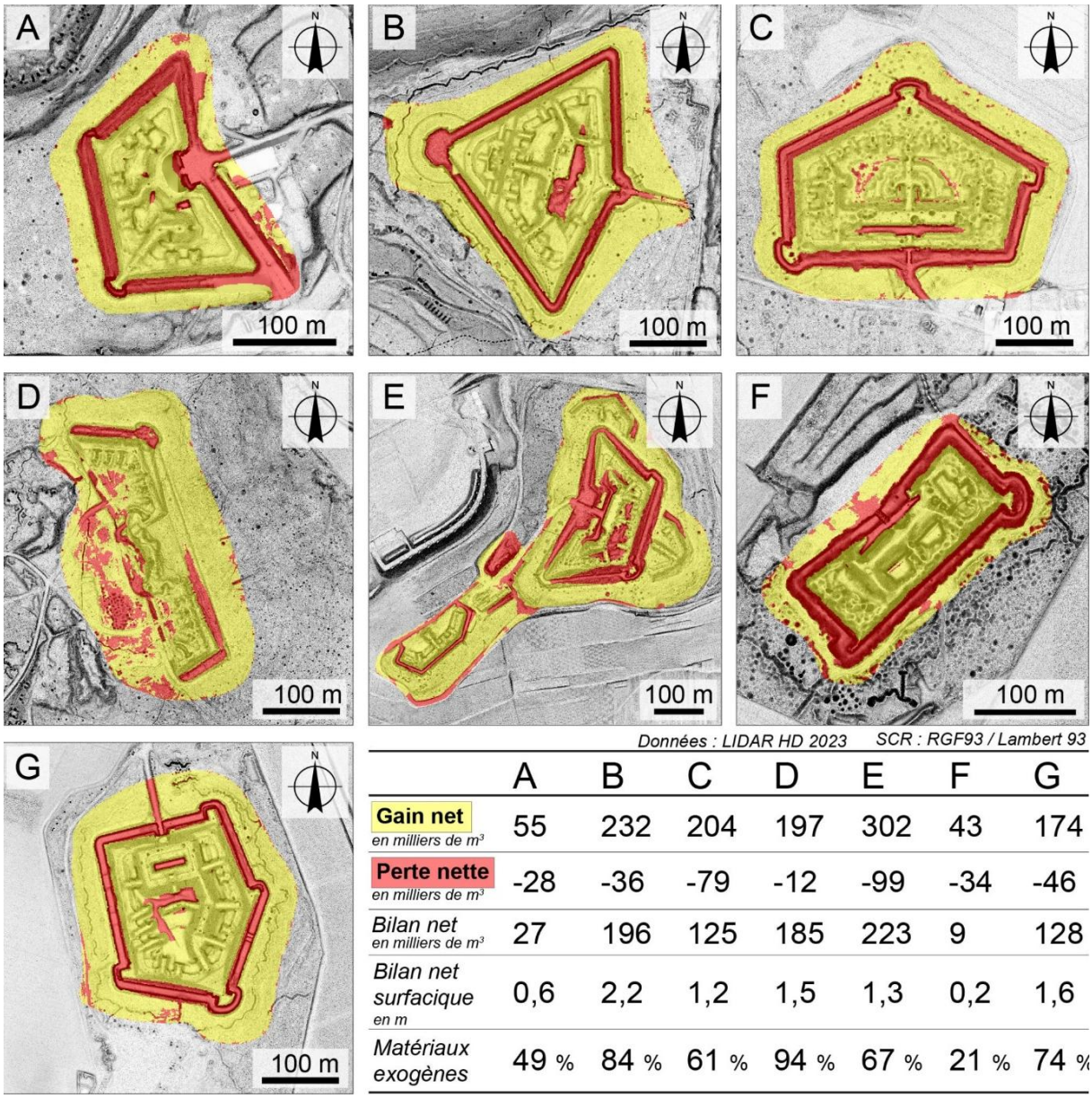


Figure 5.18 : Reconstitution de la topographie initiale du site de la batterie de Loivre. A : Croquis d'exécution de la batterie de Loivre de 1877 (Ministère de la Guerre, 1877) ; B : MNT interpolé sur la base des courbes de niveau avant travaux ; C : MNT interpolé à partir des courbes de niveau d'après le début des travaux ; D : MNT LiDAR IMPACT 14-18 (GEGENA, 2015).

Une corrélation élevée (r = 0,96) lie logiquement la surface des ouvrages au volume total bouleversé. Ce volume correspond au gain net résultant de la somme des déblais et des apports exogènes (fig. 5.19A-G). Les ouvrages les plus modestes, tels que le réduit de Chenay (2,8 ha) ou le fort de la Pompelle (2,6 ha), présentent des volumes bouleversés compris entre 45 000 et 55 000 m³, tandis que les forts les plus vastes atteignent généralement entre 170 000 et 230 000 m³. Le fort de Nogent-l'Abbesse, accompagné de

ses trois batteries annexes, constitue un cas extrême avec plus de 300 000 m³ de matériaux déplacés.

Le rapport déblais (perte nette) / volume bouleversé permet d'estimer la part de matériaux exogènes mobilisée pour chaque fortification (5.19A-G, 5.20). L'analyse met en évidence une forte dépendance aux matériaux exogènes pour les ouvrages de grande envergure, conformément aux logiques de la fortification permanente, à l'inverse des ouvrages provisoires (*e.g.,* tranchées) qui reposent sur un équilibre entre déblais et remblais (Simoutre, 1889a).



	A	B	C	D	E	F	G
Gain net en milliers de m³	55	232	204	197	302	43	174
Perte nette en milliers de m³	-28	-36	-79	-12	-99	-34	-46
Bilan net en milliers de m³	27	196	125	185	223	9	128
Bilan net surfacique en m	0,6	2,2	1,2	1,5	1,3	0,2	1,6
Matériaux exogènes	49 %	84 %	61 %	94 %	67 %	21 %	74 %

Figure 5.19 : Estimation volumétrique des espaces remblayés et déblayés des forts de Reims de la série G2. A : Réduit de Chenay ; B : Fort de Saint-Thierry ; C : Fort de Brimont ; D : Batterie de Berru ; E : Fort de Nogent-l'Abbesse ; F : Fort de la Pompelle ; G : Fort de Montbré.

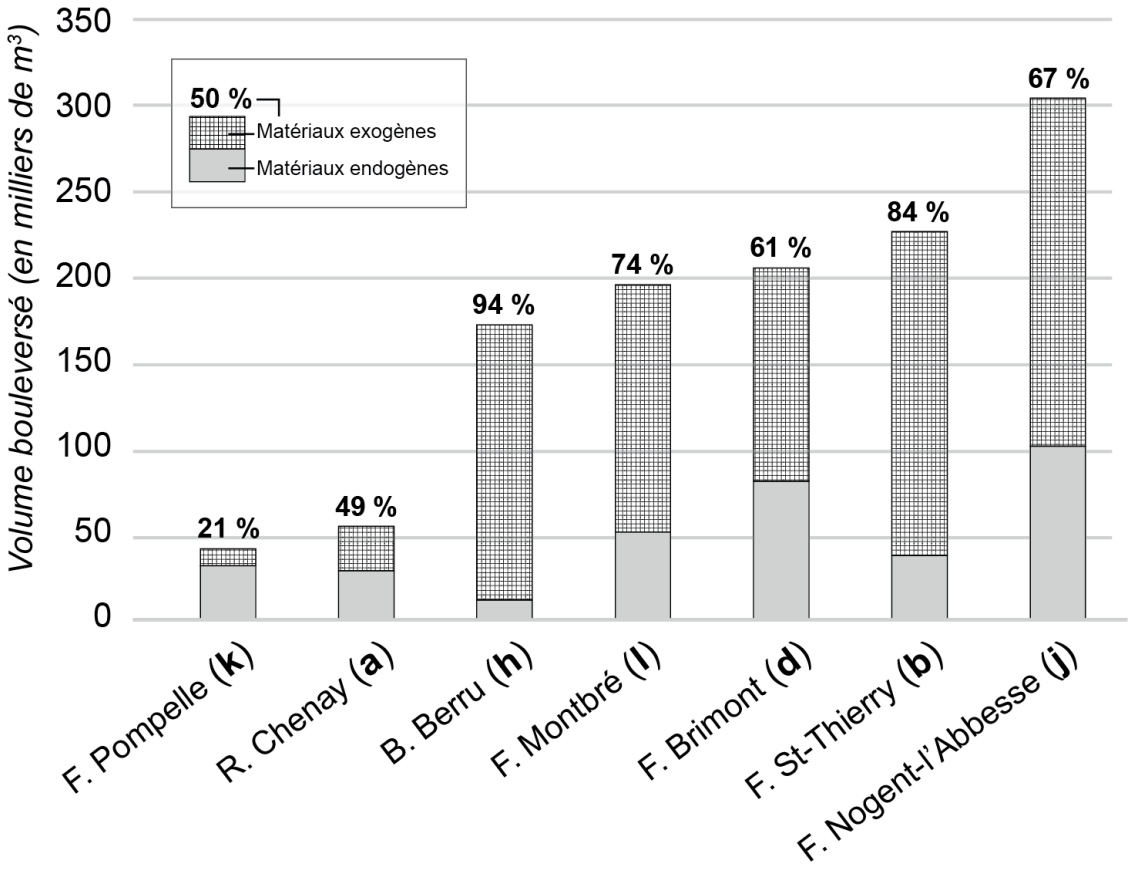


Figure 5.20 : Volumes bouleversés et proportions de matériaux exogènes des sept fortifications encore nettement perceptibles au LiDAR (groupe G2 et batterie de Berru).

Le faible volume bouleversé et la proportion réduite de matériaux exogènes dans le cas du fort de la Pompelle doivent être interprétés à la lumière de son histoire (destructions majeures durant la Première Guerre mondiale et décapage du massif de terre recouvrant le casernement dans les années 1990 ; *cf.* parties 6.1.2 et 6.1.3). La batterie de Berru présente également une valeur atypique : l'important écart topographique transversal (près de 6 m de variation ; fig. 5.21A-B) pourrait traduire une limite méthodologique liée à l'estimation du modèle initial.

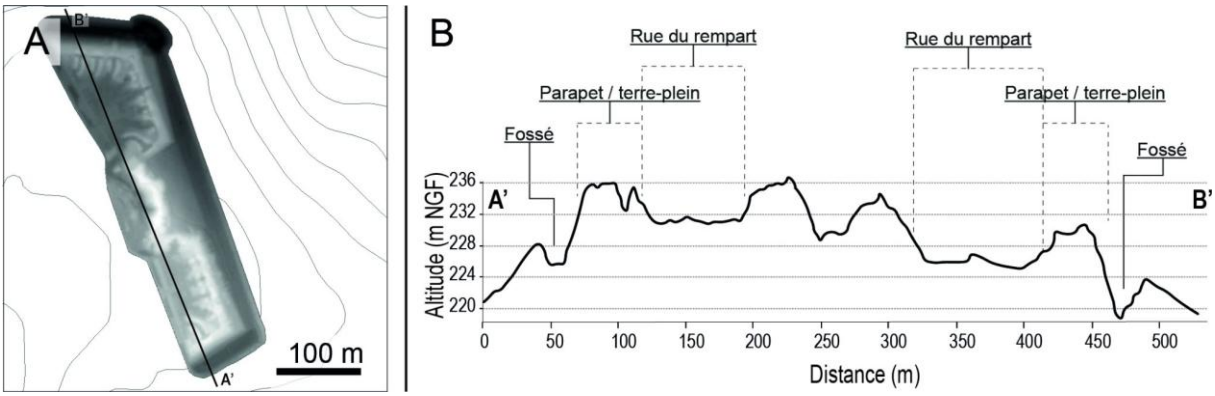


Figure 5.21 : Morphologies de la batterie de Berru. A : MNT LIDAR HD IGN (2023) ; B : Coupe topographique transversale.

Le bilan surfacique net, obtenu en rapportant le volume global à la superficie remaniée, montre un gain moyen de matériaux réparti entre 0,5 et 2 m d'épaisseur sur les sites fortifiés. Ce chiffre masque toutefois des contrastes fonctionnels (*cf.* partie 2.4.2 ; Simoutre, 1889a) : (i) sur le glacis, les remblais éliminent les angles morts et forment le chemin couvert en contre-haut de la contrescarpe tout en masquant l'escarpe ; (ii) sur le corps du fort, les matériaux participent principalement au blindage, justifiant des épaisseurs bien plus importantes (*cf.* parties 5.2.3.1.2 et 6.1.1.1).

Nom	Code	Volume arrondi
Fort de Nogent-l'Abbesse	j	300 000 m³
Fort de Witry-lès-Reims	g	250 000 m³
Fort de Saint-Thierry	b	230 000 m³
Fort de Brimont	d	200 000 m³
Batterie de Berru	h	200 000 m³
Fort de Montbré	l	170 000 m³
Fort de Fresne	f	100 000 m³
Batterie de Loivre	c	50 000 m³
Réduit de Chenay	a	50 000 m³
Fort de la Pompelle	k	50 000 m³
Vigie de Berru	i	30 000 m³
Batterie du Cran	e	30 000 m³
Total		**1 660 000 m³**

Tableau 5.7 : Estimation du volume bouleversé par la construction des forts de Reims entre 1875 et 1885. En vert : polémoformes les mieux conservées reposant sur les données LiDAR (groupe G2 et batterie de Berru) ; en orange : ouvrages plus effacés extrapolés à partir des premiers (autres forts du groupe G1).

Au total, ces sept méso-formes impliquent 1,2 millions de m³ de terres perturbées, dont 330 000 m³ déblayés et 870 000 m³ d'apports exogènes, soit en moyenne 172 000 m³ par ouvrage, à deux tiers d'origine *ex situ*. L'extrapolation de ces ordres de grandeur, aux cinq autres forts permet d'estimer remaniement d'environ 1,7 million de m³ de géomatériaux pour la construction de la ceinture fortifiée de Reims entre 1875 et 1885 (tab. 5.7).

Après une hiérarchisation selon l'indice de rugosité, l'étude des dénivelés théoriques a confirmé une standardisation relativement élevée du relief au niveau du couple rempart-fossé, ce qui a permis d'engager une analyse plus poussée du degré d'effacement fondée sur la distribution statistique des valeurs de pente du fossé. Cette approche volumétrique met en évidence l'ampleur des bouleversements topographiques induits par la construction des forts de Reims et suggère, à travers la proportion de matériaux exogènes, l'impact morphologique *ex situ* des sites d'extraction. Elle complète l'analyse topographique des polémoformes réalisée à partir des données LiDAR à l'échelle de l'ensemble du fort.

Après la forme globale, la focale se resserre sur l'échelle interne. La section suivante mobilise l'inventaire LiDAR pour caractériser précisément l'organisation morpho-fonctionnelle des forts.

5.2.3. Approche topographique LiDAR (échelle de l'organisation interne)

Les forts Séré de Rivières, véritables méga-polémoformes, rassemblent un ensemble complexe de structures sub-surfaciques et surfaciques (*cf.* partie 2.4.2). Cette section examine leur organisation topographique interne à partir du LiDAR, dans le double objectif d'évaluer la part de standardisation et la part d'adaptabilité dans la construction des forts. Les ouvrages les mieux conservés autorisent une restitution détaillée des structures, tandis que les plus altérés ne livrent que quelques indices morphologiques ténus. L'inventaire cartographique fondé sur le LiDAR est présenté structure par structure en distinguant deux approches :

- pour les forts les plus lisibles (fig. 5.22A-F), regroupés au sein du G2, une analyse organisée selon une logique fonctionnelle, entre les morphologies relatives à l'action lointaine, à la défense rapprochée et, dans une moindre mesure, les organes d'intendance invisibles en surface ; fig. 2.18A) ;

- pour les ouvrages fortement dégradés (G1), une présentation plus succincte des structures encore perceptibles.

5.2.3.1. Morphologies les plus lisibles

Les forts de la série G2 sont les moins effacés et présentent les morphologies internes les plus lisibles. Le LiDAR permet d'en restituer l'organisation topographique en distinguant d'abord les structures liées à l'action lointaine, puis celles associées à la défense rapprochée. Les structures sub-surfaciques relatives à l'intendance sont ensuite évoquées avant d'examiner certaines des morphologies les plus atypiques.

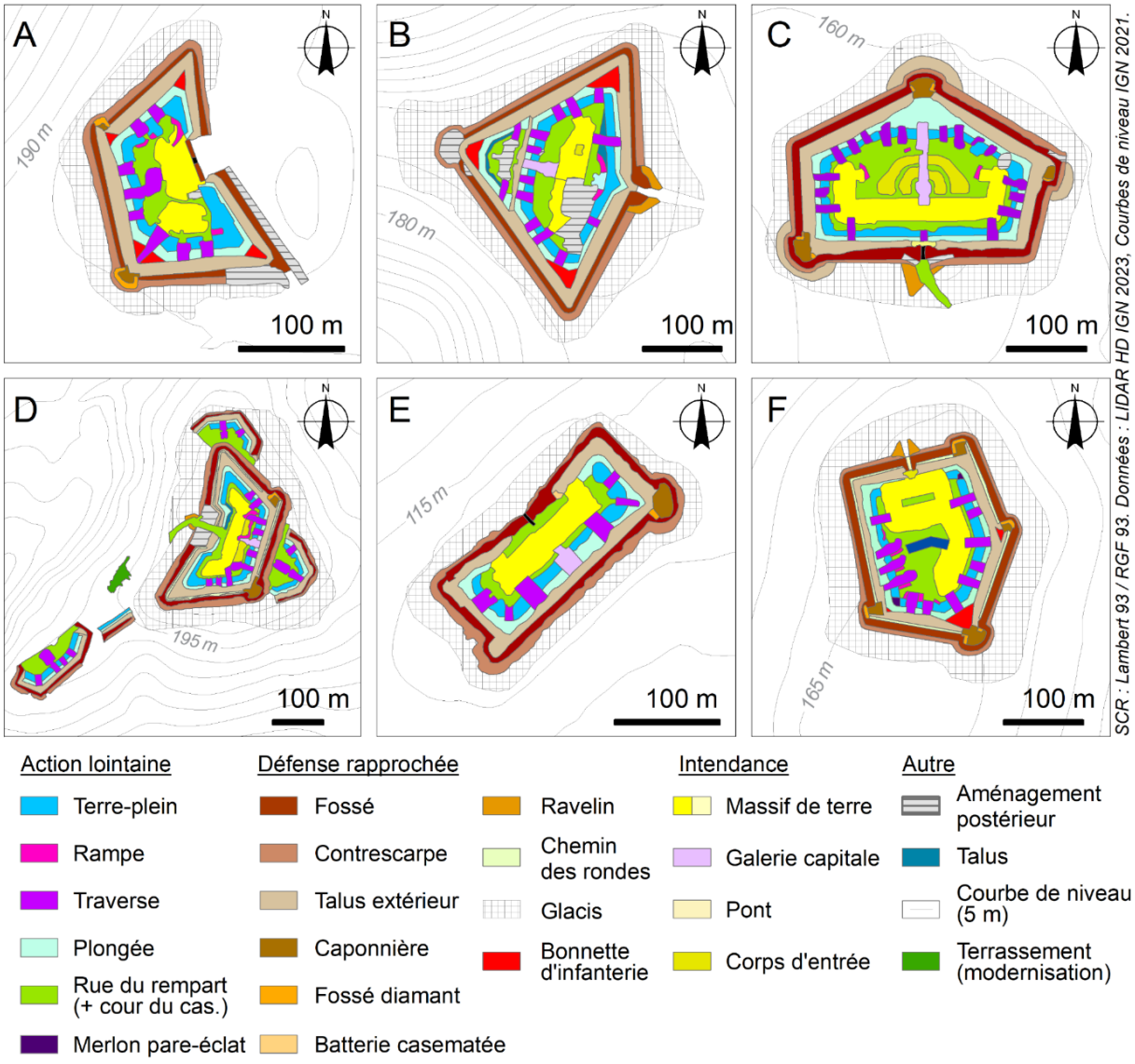


Figure 5.22 : Inventaire des morphologies internes aux forts Séré de Rivières de la ceinture de Reims les plus lisibles (groupe G2). A : Réduit de Chenay ; B : Fort de Saint-Thierry ; C : Fort de Brimont ; D : Fort de Nogent-l'Abbesse ; E : Fort de la Pompelle ; F : Fort de Montbré.

5.2.3.1.1. Action lointaine

Les formes associées à l'action lointaine relèvent du parapet, c'est-à-dire à la partie sommitale du rempart où se concentrent les dispositifs d'artillerie. Elles se répartissent en deux ensembles morphologiques distincts (Simoutre, 1889a) : un versant interne, en arrière de la crête d'artillerie ; un versant externe, en avant de la crête (fig. 2.18A-B, 5.16A). Le premier ensemble regroupe les aménagements en arrière de la crête d'artillerie, ou crête intérieure, directement liés au fonctionnement de l'artillerie en batterie à ciel ouvert, qui structurent l'organisation interne des remparts : terre-pleins, traverses, rampes d'accès et rue du rempart.

i) Terre-pleins

Les terre-pleins hébergent les plateformes d'artillerie à ciel ouvert, vouées au fonctionnement de l'artillerie de combat à tir direct (ou « de plein fouet »). Ils désignent morphologiquement des surfaces planes aménagées au sommet des remparts, circonscrites à l'avant par le parapet, à l'arrière par la rue du rempart et un parados, et latéralement par des traverses, parfois desservis par une rampe d'accès (fig. 5.23A-C).

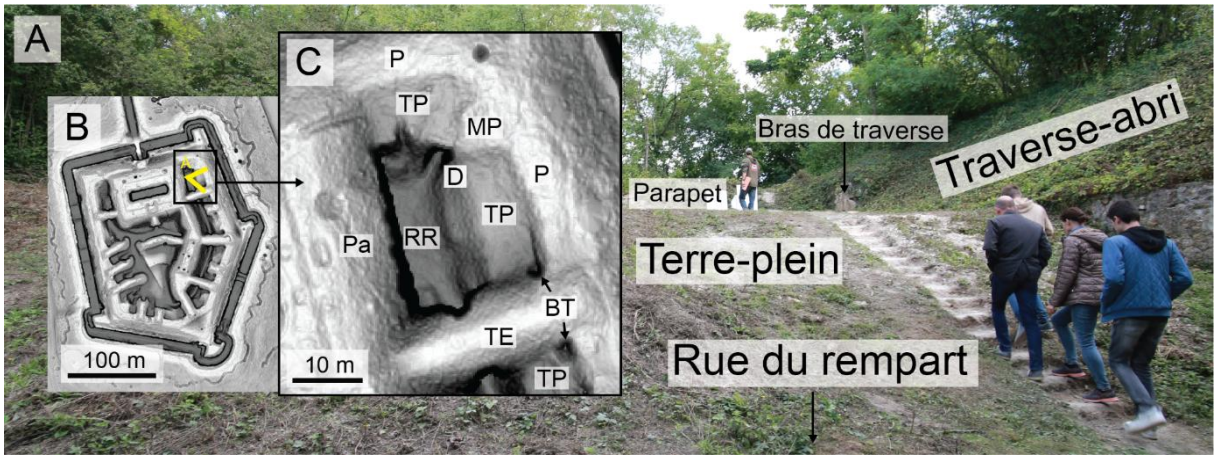


Figure 5.23 : Exemple d'un terre-plein et des polémoformes associées au fort de Montbré (l). A : Photographie prise lors des journées européennes du patrimoine 2022 ; B : MNT LiDAR traité visuellement du fort de Montbré (pente + LRM en transparence) ; C : Agrandissement sur les terre-pleins du secteur nord-est du fort. BT : Bras de traverses ; D : Descenderie de la caponnière simple du front de gorge ; MP : Merlon pare-éclat ; P : Parapet (la plongée en constitue le sommet) ; Pa : Parados (talus oriental du massif central) ; RR : Rue du rempart ; TE : Traverse-abri enracinée ; TP : Terre-plein.

L'analyse menée sur l'ensemble des forts de la série G2 met en évidence 88 entités pour une surface cumulée de 22 831 m² et une surface moyenne atteignant environ 258 m², avec des valeurs très contrastées allant de 60 à 1 207 m² (tab. 5.8). Le linéaire total de front représenté par ces terre-pleins s'élève à 2 615 m. Rapportée à la superficie totale des forts, la part des terre-pleins oscille entre 6 et 8 %, avec un maximum de 11 % au réduit de Chenay.

Nom	Code	Nb. réel	S (m²)	S^{min} (m²)	S^{max} (m²)	S^{moy} (m²)	P^{rel}	Lin.
Réduit de Chenay	a	9	2 803	96	1 138	311	11 %	274
Fort de Saint-Thierry	b	14	4 004	87	1 144	286	7 %	396
Fort de Brimont	d	20	4 666	60	852	233	7 %	459
Fort de Nogent-l'Abbesse	j	22	6 813	73	1 207	309	8 %	742
Fort de la Pompelle	k	8	1 811	141	315	226	7 %	199
Fort de Montbré	l	15	2 734	62	331	182	6 %	301
Total		88	22 831	87	831	258	8 %	395

Tableau 5.8 : Statistiques relatives aux terre-pleins des polémoformes de la série G2. Lin : Linéaire (en m) ; Nb : Nombre ; P^{rel} : Part rapportée à la surface totale ; S : Surface totale ; S^{max} : Surface maximale ; S^{min} : Surface minimale ; S^{moy} : Surface moyenne.

Les écarts de surface s'expliquent par la position des entités au sein des forts. Les formes les plus vastes correspondent aux terre-pleins du front de gorge, souvent réservés à des pièces de flanquement plus petites et moins cloisonnés par des traverses, dans le but de respecter le principe d'irréversibilité de la fortification, ce qui accroît mécaniquement la surface unitaire. À l'inverse, les terre-pleins du front de tête présentent une largeur transversale plus restreinte (jusqu'à 6 m entre deux traverses), conséquence directe d'un cloisonnement plus marqué destiné à limiter les effets des tirs ennemis (direct, d'écharpe, d'enfilade, de revers ; annexe 4). Ce cloisonnement est accentué localement par la présence d'un merlon pare-éclat (fig. 5.23C). Ils sont en revanche plus longs dans l'axe longitudinal, entre la rue du rempart et le parapet, afin de permettre le recul et la manœuvre des pièces d'artillerie.

On distingue par ailleurs les ouvrages où les terre-pleins forment une bande continue en arrière de la crête d'artillerie de ceux où cette bande est incomplète, comme dans le cas des fronts bastionnés à l'air libre (fig. 5.22A, D-E) ou du fort de Montbré dont la gorge est occupée par le massif central (fig. 5.22F).

ii) Traverses

Les traverses sont des massifs de terre disposés perpendiculairement à la crête d'artillerie, alternant avec les terre-pleins pour cloisonner le parapet et casser les tirs d'enfilade (fig. 5.24A-D). Lorsqu'elles sont casematées (traverses-abris), elles offrent en outre un abri pour les servants et un magasin pour les munitions, desservis par des bras de traverses latéraux (fig. 2.20A-B).

L'inventaire cartographique recense au total 79 traverses au sein de la série G2. Leur nombre varie fortement de 7 (fort de la Pompelle) à 18 (fort de Nogent-l'Abbesse) et 19 (fort de Brimont). Cette variation reflète globalement la surface des ouvrages, les plus vastes comptant davantage de traverses. À surface rapportée, la densité décroît toutefois légèrement avec la taille (*e.g.*, Chenay, 0,31 ; Nogent, 0,21). L'empreinte cumulée atteint 25 500 m², soit en moyenne 310 m² par traverse avec pour extrêmes 104 et 1 459 m² (traverse-abri enracinée capitale du fort de Brimont). À l'échelle des forts, les traverses occupent 8-9 % de la surface totale.

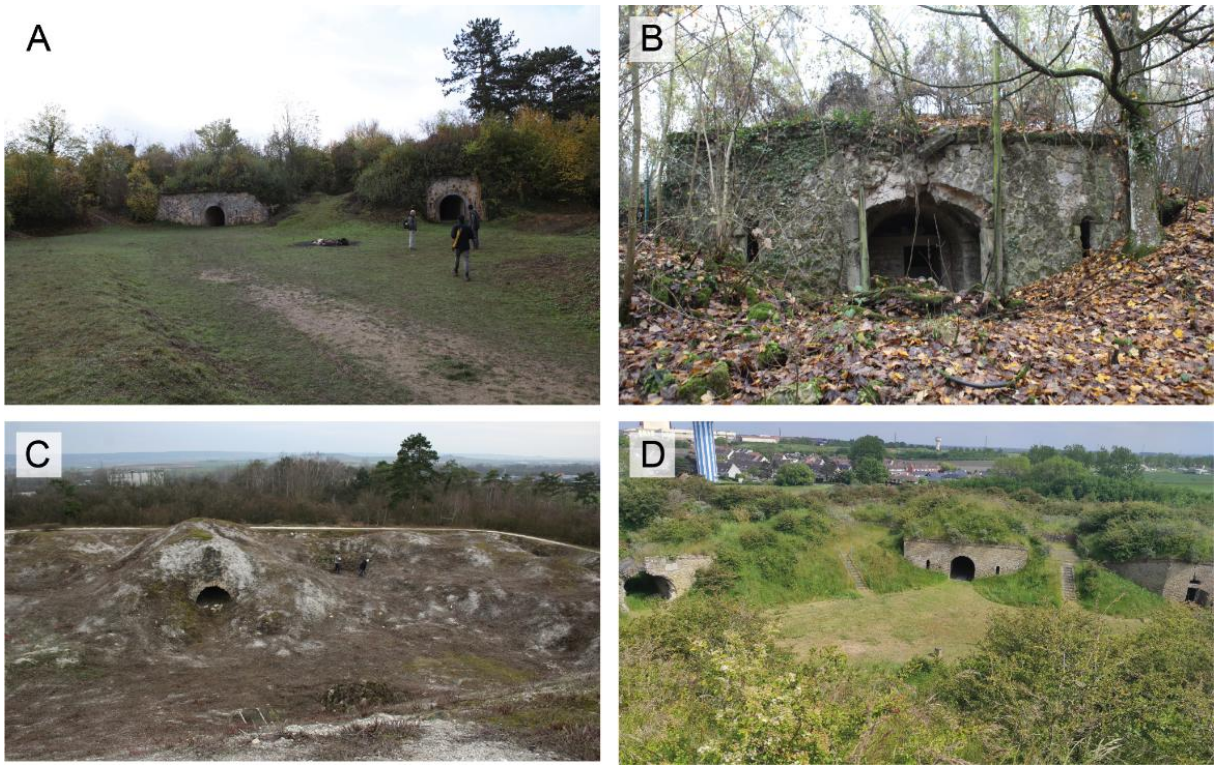


Figure 5.24 : Exemples de traverses-abris. A : Fort de Montbré ; B : Réduit de Chenay ; C : Fort de la Pompelle ; D : Fort des Dunes (place de Dunkerque).

Sur le plan volumétrique, la quasi-intégralité des structures correspond à des traverses-abris droites, attestant d'une prédominance des volumes creux intégrant une fonction de protection (fig. 2.20A-B ; tab. 5.9). D'un point de vue morphologique, il peut s'agir principalement de traverses droites, qui sont enracinées lorsqu'elles sont prolongées jusqu'au parados pour renforcer la protection contre les coups de revers et d'enfilade (environ un tiers ; tab. 5.9 ; fig. 5.25A-C). Dans quelques forts, ces dernières peuvent constituer un prolongement de la galerie capitale (Pompelle, Brimont, Nogent-l'Abbesse, Saint-Thierry).

Nom	Code	Nb. théorique T.	A.	E.	C.	Nb. réel T.	A.	E.	C.	S (m²)	S^{min} (m²)	S^{max} (m²)	S^{moy} (m²)	P^{rel}	N^{rel}
Réduit de Chenay	a	8	8	2	/	8	8	2	/	2 011	136	586	251	8 %	0,31
Fort de Saint-Thierry	b	15	9	3	1	15	9	5	1	4 352	156	953	290	8 %	0,27
Fort de Brimont	d	20	20	7	1	19	19	7	1	6 049	104	1 459	318	9 %	0,28
Fort de Nogent-l'Abbesse	j	18	18	8	1	18	18	8	1	7 101	189	1 035	395	8 %	0,21
Fort de la Pompelle	k	9	7	1	1	7	5?	1	1	2 041	110	497	292	8 %	0,27
Fort de Montbré	l	12	12	5	/	12	12	5	/	3 984	201	505	332	8 %	0,25
Total / moyenne		82	74	26	4	79	71	26	4	25 538	149	839	313	8 %	0,27

Tableau 5.9 : Statistiques relatives aux traverses de la série G2. A : Traverse-abri ; C : Traverse capitale ; E : Traverse enracinée ; Nb : Nombre ; N^{rel} : Nombre rapporté à la surface totale ; P^{rel} : Part rapportée à la surface totale ; S : Surface totale ; S^{max} : Surface maximale ; S^{min} : Surface minimale ; S^{moy} : Surface moyenne ; T : Traverse.

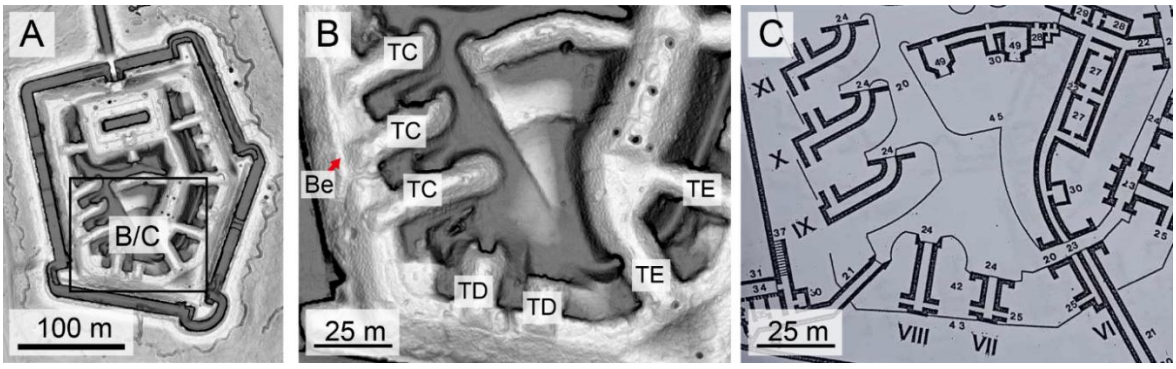


Figure 5.25 : Typologie morphologique des traverses-abris. A : MNT LIDAR HD traité visuellement (pente + LRM en transparence) du fort de Montbré (2023) ; B : Agrandissement sur les traverses-abris du front de tête ; C : Plan correspondant (Fouqueray, 2003). Be : Berme ; TC : Traverse-abri coudée ; TD : Traverse-abri droite ; TE : Traverse-abri enracinée.

Les surfaces des traverses-abris « classiques » s'établissent le plus souvent autour de 200 m², avec de nombreux cas entre 300 et 400 m², et des *maxima* proches de 1 000 m² pour les traverses enracinées. Leur section est subtrapézoïdale, avec des pentes sommitales légèrement inclinées pour favoriser l'écoulement de l'eau (2.20A ; Simoutre, 1889a). Leur largeur varie de 4 m, à parfois plus de 10 m, comme au fort de Montbré (fig. 5.25B-C). L'écartement des axes longitudinaux est généralement conforme aux prescriptions (*c.* 20 m), avec des espacements accrus aux angles, généralement dépourvus de traverses (fig. 5.25B).

Quelques particularités locales méritent d'être signalées :

- Traverses coudées de Montbré et Brimont : trois traverses-abris du fort de Montbré présentent un tracé coudé qui oriente leur entrée obliquement par rapport à la crête intérieure (fig. 5.25B-C). Cette disposition, adoptée pour limiter les tirs de revers, dirige leur face postérieure vers le nord. Au fort de Brimont, les documents planimétriques signalent trois traverses coudées sur le front de tête. Dans le relief actuel, les n°8 et 10 restent perceptibles, mais leur tracé courbe se traduit mal morphologiquement et n'est véritablement identifiable qu'à partir des plans (fig. 5.26A-C). La n°12, en revanche, a pratiquement disparu sous l'effet des tirs d'obus durant la guerre (*cf.* parties 5.3.2.3 et 6.1.2.3).

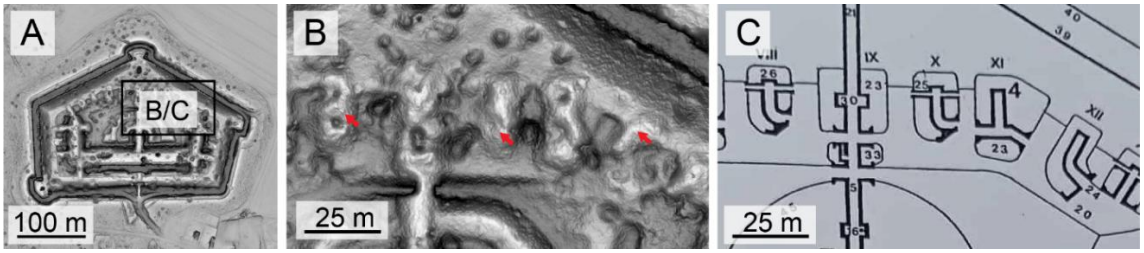


Figure 5.26 : Traverses-abris coudées du fort de Brimont. A : MNT LIDAR HD traité visuellement (pente + LRM en transparence) du fort de Brimont (2023) ; B : Agrandissement sur les traverses-abris coudées du front de tête (flèches rouges) ; C : Plan du sous-sol du fort de Brimont correspondant (Fouqueray, 2003).

- Berme du fort de Montbré : alors que le talus de tête de la traverse constitue généralement le prolongement du talus extérieur, la plongée s'étendant de part et d'autre jusqu'à la crête d'artillerie, les traverses sont reculées d'une cinquantaine de centimètres, ménageant une berme qui facilite circulation et maintenance (fig. 5.25B ; Simoutre, 1889a).

- Traverses à étages de Witry-lès-Reims et Brimont (fig. 5.27A-F) : certaines traverses-abris comportent initialement deux niveaux, l'étage inférieur étant relié par une galerie passant sous les terre-pleins. Ce dispositif, bien qu'il n'ait laissé aucune expression morphologique lisible, est attesté par les documents planimétriques aux forts de Witry-lès-Reims et encore visible sur le terrain (7,2 ha ; fig. 5.27A-C) et de Brimont (6,8 ha ; fig. 5.27D-F), où respectivement sept traverses (n° 7-13) et trois traverses du front de tête (n°8-10) se reliaient effectivement au sous-sol. Leur présence dans ces deux forts de grande superficie apparaît cohérente avec les terrassements plus développés des ouvrages majeurs, qui seuls pouvaient intégrer un tel dispositif à plusieurs niveaux.

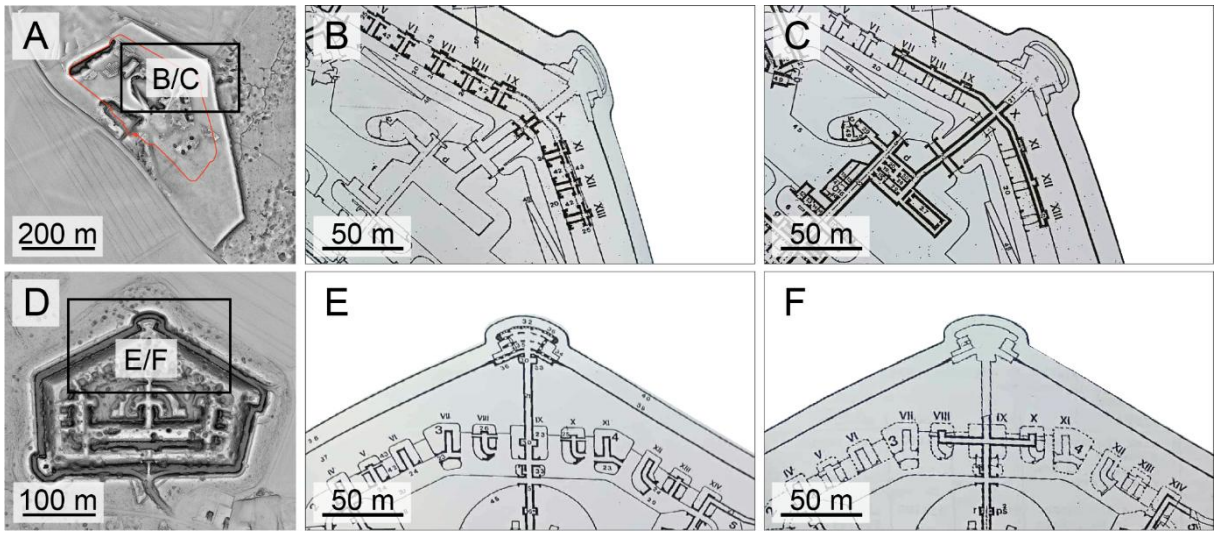


Figure 5.27 : Exemples de traverses à étages. A : MNT LIDAR HD traité visuellement (pente + LRM en transparence) du fort de Witry-lès-Reims (2023) ; B : Plans du rez-de-chaussée du fort de Brimont correspondant (Fouqueray, 2003) ; C : Plans du sous-sol du fort de Brimont correspondant (Fouqueray, 2003) ; D : MNT LIDAR HD traité visuellement (pente + LRM en transparence) du fort de Brimont (2023) ; E : Plans du rez-de-chaussée du fort de Brimont correspondant (Fouqueray, 2003) ; F : Plan du sous-sol du fort de Brimont correspondant (Fouqueray, 2003).

iii) Rampes d'accès

Les rampes d'accès sont des plans inclinés reliant la rue du rempart aux terre-pleins, afin de permettre la mise en batterie et la circulation de l'artillerie et des équipes (pièces hissées à bras d'homme).

L'inventaire recense un total de 18 rampes réparties au sein de quatre forts du G2 possédant 3-4 (réduit de Chenay, forts de Saint-Thierry et de Brimont) et 7 rampes (fort de Montbré ; fig. 5.22A-F). L'emprise cumulée atteint 1 224 m², avec une surface moyenne de 68 m² par rampe (intervalle : 29-165 m²). À l'échelle des sites, la somme des surfaces est comprise entre 200 et 400 m², soit au plus 1 % de la superficie totale (tab. 5.10).

Nom	Code	Nb. réel	S (m²)	S^{min} (m²)	S^{max} (m²)	S^{moy} (m²)	P^{rel}
Réduit de Chenay	a	4	274	29	135	69	1,1 %
Fort de Saint-Thierry	b	4	361	30	165	90	0,7 %
Fort de Brimont	d	3	226	34	102	75	0,3 %
Fort de Nogent-l'Abbesse	j	0	/	/	/	/	/
Fort de la Pompelle	k	0	/	/	/	/	/
Fort de Montbré	l	7	363	30	76	52	0,8 %
Total		18	1 224	21	80	48	0,7 %

Tableau 5.10 : Statistiques relatives aux rampes de la série G2. Nb : Nombre ; P^{rel} : Part rapportée à la surface totale ; S : Surface totale ; S^{max} : Surface maximale ; S^{min} : Surface minimale ; S^{moy} : Surface moyenne.

Trois critères typologiques sont distingués (fig. 5.28, 5.29) :

- Selon le mode de construction : en remblais ou en déblais, lorsque le plan incliné s'insère perpendiculairement au sein du terre-plein ; ou accolé à un talus, lorsque le plan incliné longe le talus postérieur du terre-plein.

- Selon la forme : rectiligne ou courbe, lorsque le plan incliné épouse le tracé d'un talus incurvé comme au réduit de Chenay (fig. 5.22A) ou au fort de Saint-Thierry (fig. 5.22B).

- Selon l'organisation : simple ou doublée, lorsqu'un même terre-plein est desservi par deux rampes divergentes ou convergentes, configuration observée sur le front de gorge du fort de Saint-Thierry (fig. 5.22B).

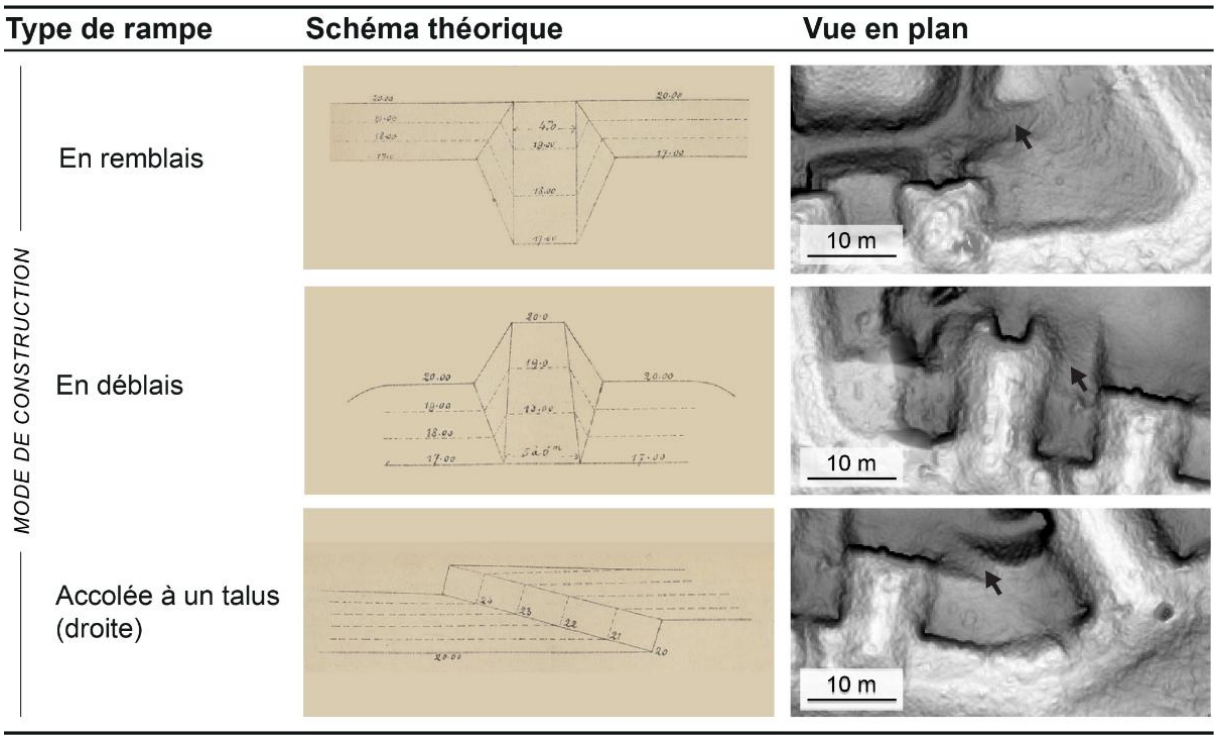


Figure 5.28 : Typologie des rampes droites et simples selon le mode de construction (d'après Simoutre, 1889b).

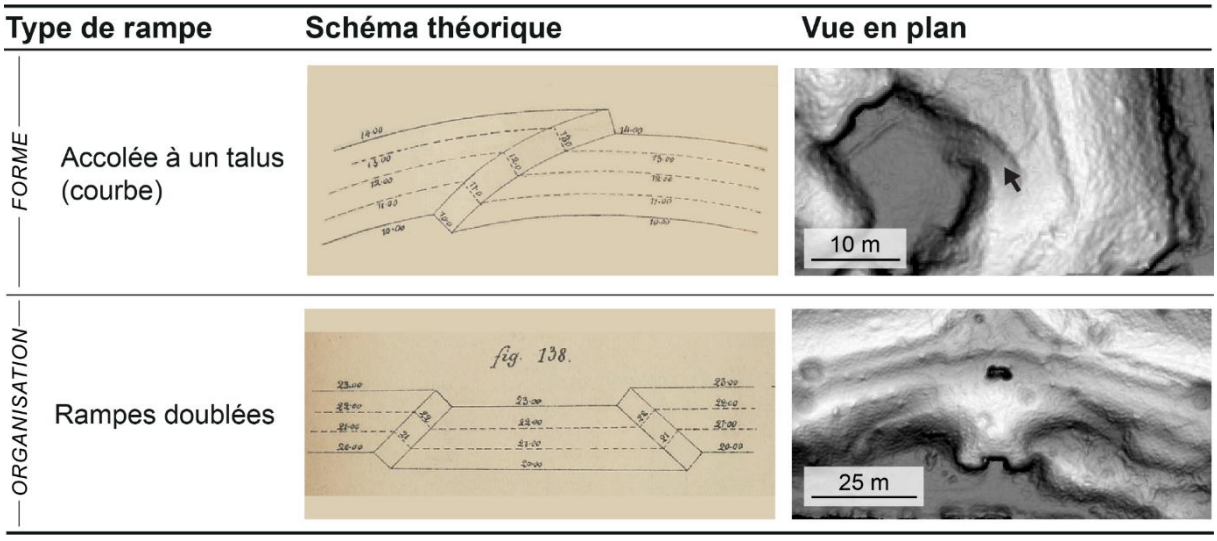


Figure 5.29 : Autres types de rampes selon la forme et l'organisation (d'après Simoutre, 1889b).

Le fort de Brimont se singularise par l'absence de rampes sur les terre-pleins qui ne se trouvent qu'au sein de la rue du rempart, dont le profil est étagé par des ruptures de pente brutales, passant de 2-3 m à près de 5 m au-dessus de la cour du casernement (fig. 5.30).

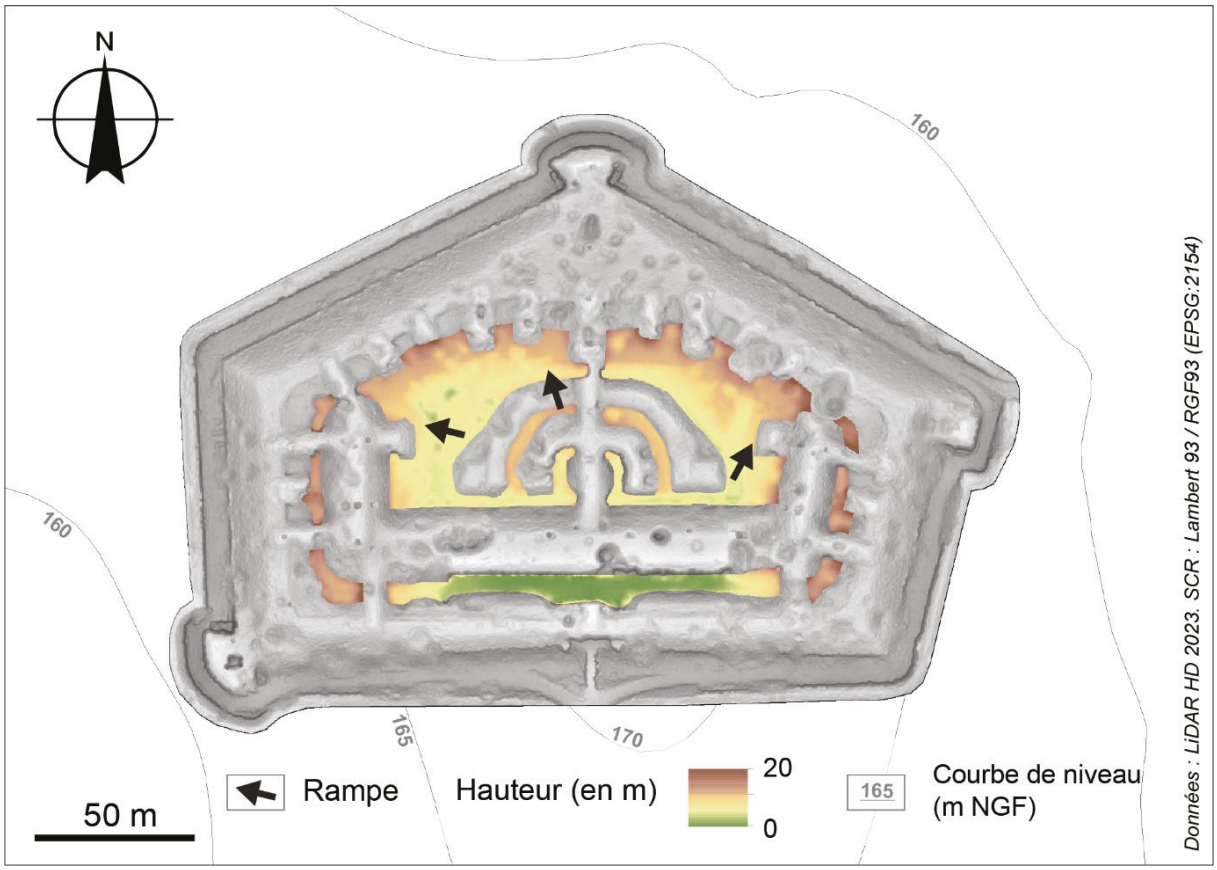


Figure 5.30 : MNT de la rue du rempart du fort de Brimont.

iv) Rue du rempart

La rue du rempart désigne l'axe de circulation interne longeant la base du rempart dans les forts à batterie basse ou à massif central (fig. 5.30, 5.31A-F, 5.32A-B). À l'air libre pour l'essentiel, pouvant localement être couverte lorsqu'elle intersecte une traverse-abri enracinée, elle assure la desserte des organes de la crête d'artillerie pour la mise en batterie (terre-pleins, traverses) et les têtes de descenderies vers les caponnières (*e.g.*, fig. 5.23C). Lorsque le casernement forme un îlot central, la rue du rempart se prolonge en cour du casernement, espace plan autour duquel s'organisent les principales substructures (corps d'entrée, magasins, casernes, *etc.* ; fig. 5.31A-F, 5.32C-F). Bien que la cour ne relève pas de l'action lointaine, elle est traitée ici avec la rue du rempart en raison de leur expression morphologique commune (de larges espaces plans encaissés dans le massif) et de leur rôle conjoint dans la circulation.

L'inventaire cartographique totalise environ 37 000 m² pour l'ensemble de la série G2, soit 6 174 m² en moyenne par fort (tab. 5.11). La part relative varie de 7,8 % (réduit de Chenay) à 15,1 % (fort de Brimont), pour une moyenne de 10,8 % de la superficie des ouvrages. Les valeurs les plus élevées sont observées aux forts de Nogent-l'Abbesse, Brimont et Montbré (≥ 10 000 m² ; > 14 %), tandis que Chenay et la Pompelle présentent les plus faibles

emprises (*c.* 2 000 m² ; *c.* 8 %). Cette gradation suggère l'importance proportionnelle de cet espace de circulation dans les forts les plus étendus par rapport aux ouvrages plus réduits.

Plusieurs cas particuliers viennent nuancer ce tableau :

- La rue du rempart des forts de Brimont et Montbré est caractérisée par l'existence d'une vaste place centrale participant à cette proportion élevée (fig. 5.31C, F, 5.32B).

- À l'inverse au fort de Nogent-l'Abbesse, les trois batteries annexes majorent fortement l'emprise totale, car leurs rues du rempart représentent entre un quart et un tiers de leur surface. Le fort principal, pris isolément, ne compte qu'environ 3 000 m² d'espaces de circulation (soit 5,8 % de ses 5,2 ha ; fig. 5.31D, 5.32A).

- Le fort de Brimont présente pour sa part une rue du rempart étagée par des ruptures de pente marquées, justifiant la présence des rampes pour franchir ces dénivelés (fig. 5.30).

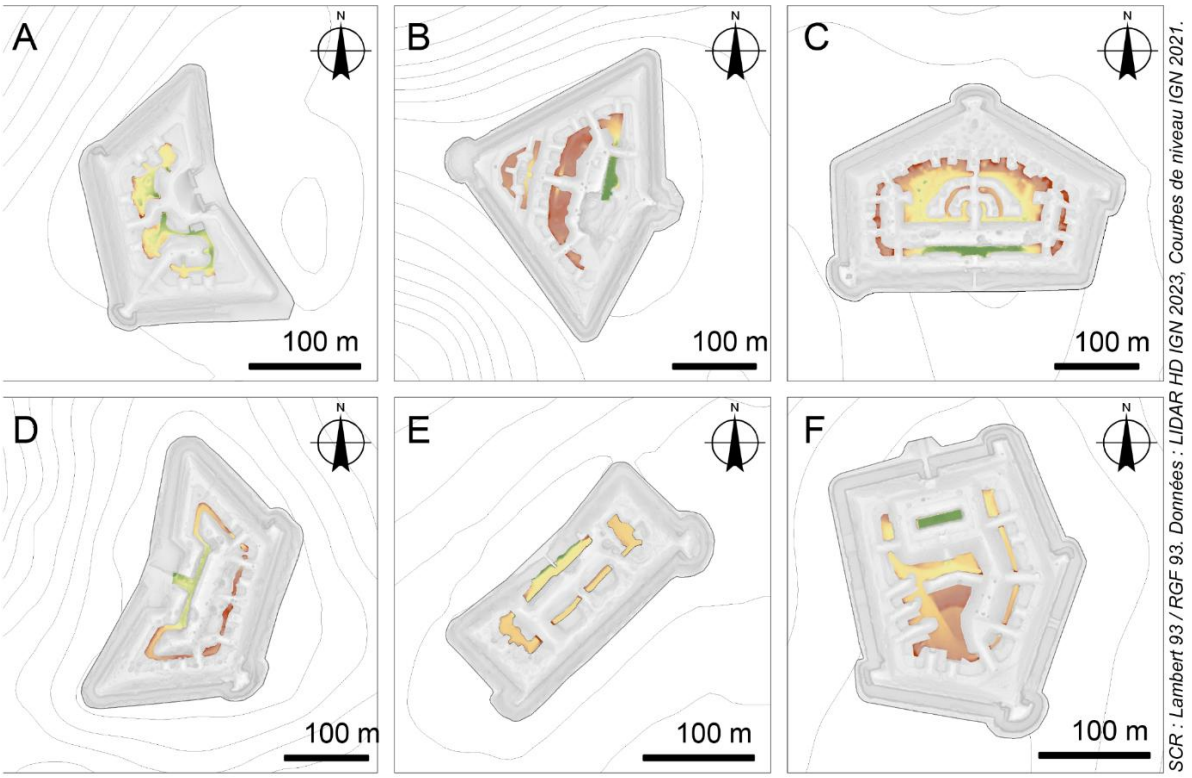
- Le fort de Montbré constitue le seul cas présentant une cour totalement fermée par un double casernement dédié aux structures d'intendance (fig. 5.22F, 5.32D ; *cf.* partie 5.2.3.1.2).

- Enfin, certains ouvrages ne disposent pas de cour du casernement à proprement parler car le casernement est intégré au front de gorge, comme en témoigne le réduit de Chenay (fig. 5.22A, 5.31A, 5.32F), et comme ce fut le cas au fort de Witry-lès-Reims ou dans la batterie de Berru, aujourd'hui démantelés (*cf.* partie 5.2.3.2).

Nom	Code	S (m²)	P^{rel}
Réduit de Chenay	a	2 013	7,8 %
Fort de Saint-Thierry	b	5 310	9,6 %
Fort de Brimont	d	10 309	15,1 %
Fort de Nogent-l'Abbesse	j	12 584	14,5 %
Fort de la Pompelle	k	2 041	7,9 %
Fort de Montbré	l	4 788	10,1 %
Total / moyenne		37 045	10,8 %

Tableau 5.11 : Statistiques relatives aux espaces de circulation interne des forts du groupe G2 (rue du rempart, cour du casernement). P^{rel} : Part rapportée à la surface totale ; S : Surface totale.

Au-delà de ces singularités, une logique altimétrique récurrente apparaît avec la rue du rempart qui est presque toujours plus élevée au front de tête qu'au front de gorge, d'après un différentiel moyen d'environ 9 m (fig. 5.31A-F). Cette dissymétrie traduit un massif rehaussé côté ennemi pour optimiser la hauteur de tir. À l'inverse, il est abaissé côté gorge pour défiler à la vue et protéger les organes intérieurs.



	A	B	C	D	E	F
ALTITUDE	210	198	169	213	128	175
	203	187	159	204	118	166

Courbe de niveau (5 m)

Données : LIDAR HD 2023
SCR : RGF93 / Lambert 93

Figure 5.31 : MNT de la rue des remparts des forts du groupe G2. A : Réduit de Chenay ; B : Fort de Saint-Thierry ; C : Fort de Brimont ; D : Fort de Nogent-l'Abbesse ; E : Fort de la Pompelle ; F : Fort de Montbré.

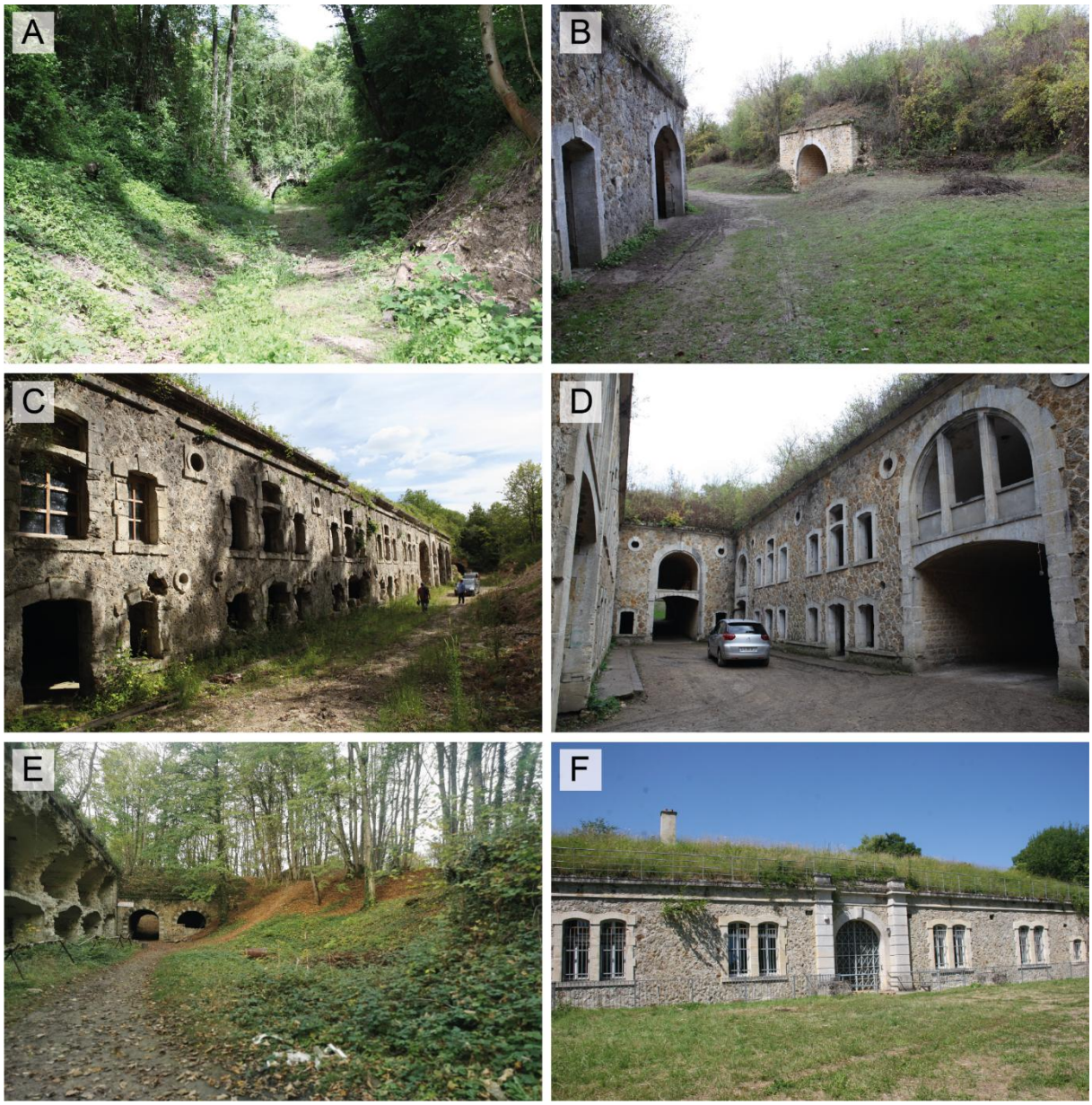


Figure 5.32 : Exemples de rues du rempart (A-B) et de cours du casernement (C-E) et d'un casernement donnant sur la gorge (F) des forts de la ceinture de Reims. A-C : Fort de Nogent-l'Abbesse ; B-D : Fort de Montbré ; E : Fort de Saint-Thierry ; F : Réduit de Chenay.

v) Plongées et talus extérieurs

En vis-à-vis de ces aménagements internes, le second ensemble de formes, également associé à l'action lointaine, se développe à l'extérieur de la crête d'artillerie (fig. 2.18A-B, 5.16A). Il comprend la plongée et le talus extérieur, dont la vocation conjointe est d'assurer le défilement des pièces et des personnels, ainsi que la stabilité du rempart (fig. 5.33A-B). La plongée, correspondant au plan incliné sommital du parapet, masque les servants sans obérer l'angle de tir et contribue à dévier les projectiles. Le talus extérieur, constituant la masse principale du rempart prolongeant cette pente jusqu'au couronnement du mur d'escarpe, absorbe les impacts et impose un angle calculé pour prévenir les glissements. Ce

versant artificiel peut accueillir des dispositifs défensifs secondaires, tels que bermes (*e.g.*, fort de Montbré ; fig. 5.25B) et bonnettes (*cf.* partie 5.2.3.1.2).

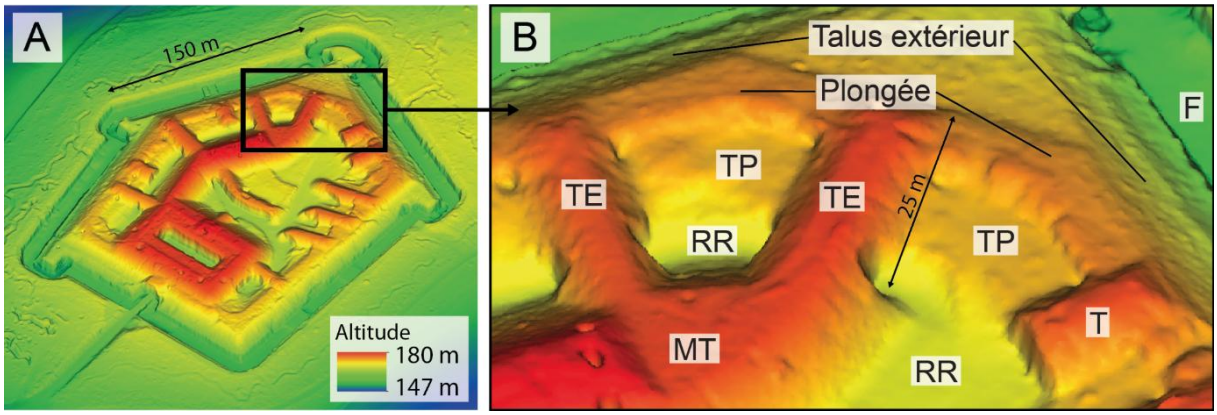


Figure 5.33 : Morphologies du rempart du front de tête du fort de Montbré. A : Vue topographique en perspective (données LIDAR HD IGN 2023) ; B : Agrandissement sur le rempart du front de tête. F : Fossé ; MT : Massif central du fort ; RR : Rue du rempart ; T : Traverse-abri ; TE : Traverse-abri enracinée ; TP : Terre-plein.

L'inventaire recense 76 entités de plongée pour les ouvrages de la série G2, totalisant environ 21 600 m² (*c.* 3 600 m² par fort ; tab. 5.12). Les surfaces unitaires s'échelonnent de 23 à 3 432 m² (moyenne 338 m²), pour une emprise relative comprise entre 5 % (fort de Brimont) et 9 % (réduit de Chenay), avec une moyenne proche de 7 %. Le nombre d'unités varie de 6 (Pompelle) à 23 (Nogent-l'Abbesse), qui concentre à lui seul près du tiers. La pente moyenne est de 15° (intervalle : 12,5-18,3°), légèrement supérieure aux préconisations théoriques de 10-15° (Simoutre, 1889a). Ces métriques sont logiquement proches de celles des terre-pleins (tab. 5.8), les deux types de formes étant délimités latéralement par les traverses et se succédant dans la partie sommitale du rempart. Elles confirment une même dissymétrie fonctionnelle marquée par des plongées développées au front de tête et plus modestes à la gorge, où une crête d'infanterie peut se substituer à l'artillerie conformément au principe d'irréversibilité mis en œuvre dans les forts de ceinture.

Nom	Code	Nb. réel	S (m²)	S^{min} (m²)	S^{max} (m²)	S^{moy} (m²)	P^{rel}	$Pente^{moy}$
Réduit de Chenay	a	9	2 197	78	596	244	9 %	13,4°
Fort de Saint-Thierry	b	16	4 246	67	883	265	8 %	12,5°
Fort de Brimont	d	12	3 432	44	3 432	510	5 %	16°
Fort de Nogent-l'Abbesse	j	23	6 360	23	1 293	277	7 %	16,1°
Fort de la Pompelle	k	6	2 178	240	487	363	8 %	18,3°
Fort de Montbré	l	10	3 162	55	1 372	367	7 %	14,2°
Total / Moyenne		85	21 575	85	1 344	338	7 %	15°

Tableau 5.12 : Statistiques relatives aux plongées de la série G2. Moy : Moyenne ; Nb : Nombre ; P^{rel} : Part rapportée à la surface totale ; S : Surface totale ; S^{max} : Surface maximale ; S^{min} : Surface minimale ; S^{moy} : Surface moyenne.

Nom	Code	S (m²)	P^{rel}	$Pente^{moy}$
Réduit de Chenay	a	2 013	24 %	29,6°
Fort de Saint-Thierry	b	5 310	21 %	32,8°
Fort de Brimont	d	10 309	16 %	33,4°
Fort de Nogent-l'Abbesse	j	12 584	19 %	32,9°
Fort de la Pompelle	k	2 041	19 %	33,2°
Fort de Montbré	l	4 788	14 %	31°
Total / moyenne		57 599	19 %	32°

Tableau 5.13 : Statistiques relatives aux talus extérieurs de la série G2. Moy : Moyenne ; P^{rel} : Part rapportée à la surface totale ; S : Surface totale.

Pour les talus extérieurs, la surface cumulée atteint 57 600 m² (*c.* 9 600 m² par fort ; tab. 5.13). Il s'agit manifestement d'une des principales formes constitutives des fortifications Séré de Rivières, au regard de leur emprise relative qui atteint en moyenne 19 % de la superficie des ouvrages. Un rapport de 1,5 existe toutefois entre les forts de Montbré et Brimont, dont environ 15 % de la surface correspond au talus extérieur, et le réduit de Chenay (≈ 25 %). Les valeurs varient d'environ 5 000 m² (Pompelle) à 17 000 m² (Nogent-l'Abbesse), les forts les plus vastes (Brimont, Saint-Thierry) revêtant les totaux les plus élevés. La pente moyenne est de 32°, avec des écarts resserrés (29,6-33,4°), en accord avec les prescriptions de 1874 (33-34° ; fig. 2.18B ; Simoutre, 1889a).

L'examen des formes associées à l'action lointaine, centrées sur le parapet et ses deux versants, permet de restituer l'organisation sommitale des remparts, de la rue du rempart (dont la cour du casernement) au talus extérieur, représentant en tout un peu plus de la moitié de la surface des forts de la série G2. Au-delà de cette crête, la logique défensive se prolonge par un second groupe de dispositifs tournés vers la défense rapprochée.

5.2.3.1.2. Défense rapprochée

La présentation des formes liées à la défense rapprochée suit une progression de l'extérieur vers l'intérieur : du glacis au fossé, puis aux murs d'escarpe et de contrescarpe, organes de défense passive, jusqu'aux organes de flanquement qui les accompagnent et assurent la défense active.

i) Glacis

Le glacis est la pente douce aménagée tout autour des forts, réglée pour garantir la visibilité permanente depuis la crête d'artillerie, ou la crête d'infanterie, et réduire les angles morts (*c.* 3-10° dans la doctrine ; Simoutre, 1889a). Il expose l'assaillant à découvert tout en assurant la couverture de l'escarpe et l'aménagement éventuel d'un chemin couvert en haut de la contrescarpe. Sa jonction avec la topographie environnante apparaît souvent progressive et peu marquée dans le relief actuel, ce qui contribue à une intégration topographique forte du glacis au paysage environnant. Malgré cette transition diffuse, les profils LiDAR du couple rempart-fossé montrent que le glacis figure parmi les formes les plus persistantes de la ceinture rémoise, y compris sur des sites par ailleurs fortement remaniés (fig. 5.15A-L).

Nom	Code	S (m²)	P^rel	Pente^moy
Réduit de Chenay	a	10 941	43 %	9°
Fort de Saint-Thierry	b	34 928	63 %	10,6°
Fort de Brimont	d	30 094	44 %	9,4°
Fort de Nogent-l'Abbesse	j	63 111	73 %	13,2°
Fort de la Pompelle	k	12 885	50 %	9,1°
Fort de Montbré	l	34 856	73 %	11°
Total / moyenne		186 815	58 %	10°

Tableau 5.14 : Statistiques relatives aux glacis des forts de la série G2. Moy : Moyenne ; P^{rel} : Part rapportée à la surface totale ; S : Surface totale.

L'inventaire cartographique recense une surface cumulée d'environ 187 000 m² de glacis pour le groupe G2, soit en moyenne un peu plus de 31 000 m² par fort (tab. 5.14). Les surfaces varient fortement selon la taille des ouvrages, de près de 11 000 m² (Chenay ; fig. 5.34A-B) à 63 000 m² (Nogent-l'Abbesse). Rapportée à la superficie de chaque site, qui ne la prend pas en compte, l'emprise du glacis oscille entre 43 % et 73 % (μ = 58 %). Les pentes mesurées sont comprises entre 9° et 13,2°, qui sont des valeurs légèrement supérieures aux prescriptions théoriques (3-10°), mais compatibles avec les contraintes de visibilité et de défilement, le prolongement des plans de glacis et de parapet se croisant au-dessous des crêtes respectives (crête extérieure / crête du chemin couvert ; Simoutre, 1889a).

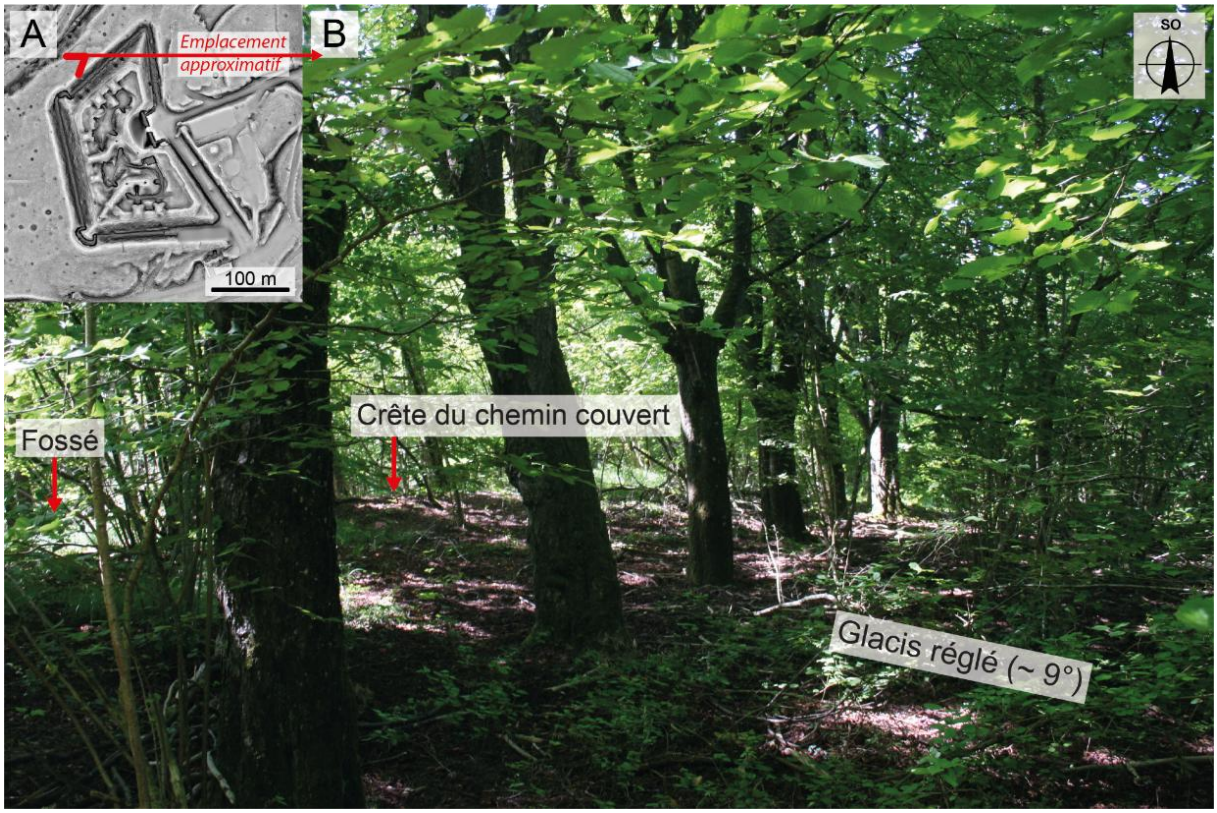


Figure 5.34 : Exemple du glacis du réduit de Chenay (a). A : MNT LIDAR HD (2023) traité visuellement (pente + LRM en transparence) ; B : Section du glacis situé sur le flanc droit du réduit (face 3-4).

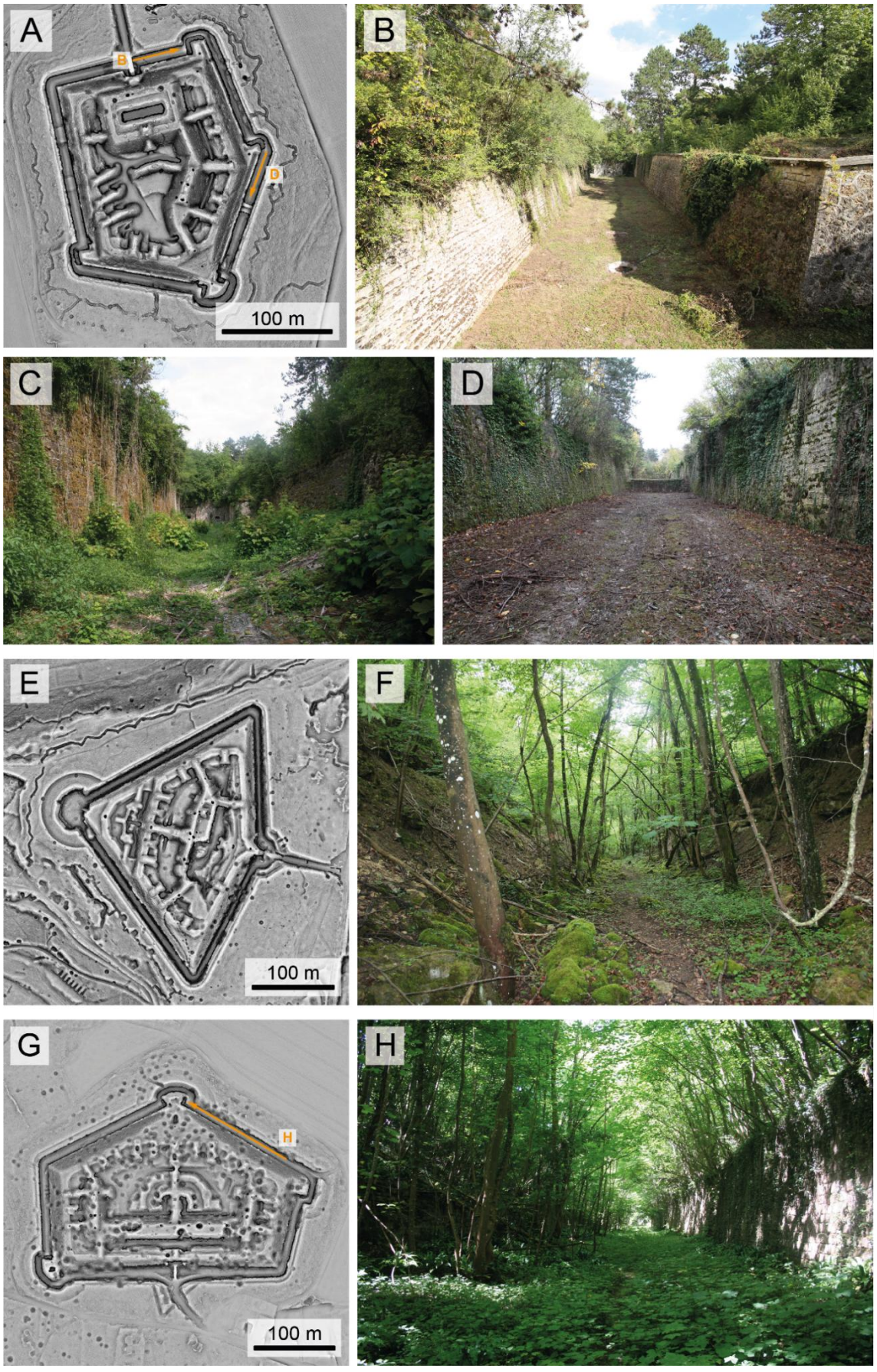
ii) Fossé (« plafond » et murs)

Le fossé forme une excavation périphérique sèche au pied du rempart (fig. 5.35A-Q). Initialement large d'environ 10 m et profond de plusieurs mètres, il constitue un creusement

continu dont le fond (ou « plafond ») présente deux pentes transversales faiblement inclinées convergeant vers l'axe afin d'assurer l'écoulement (souvent complété par une cunette ; fig. 2.18B, 5.16A). Cette morphologie rappelle sa fonction centrale : séparer assaillant et défenseur par un obstacle négatif, en complément du rempart.

La digitalisation des fossés du groupe G2 a permis de cartographier une surface cumulée de près de 40 400 m², soit en moyenne 6 700 m² par fort, allant d'environ 3 000 m² au réduit de Chenay à 11 500 m² au fort de Nogent-l'Abbesse (tab. 5.15). Rapportée à la superficie des forts, la surface du fossé représente en moyenne 13 % avec une dispersion relativement faible (intervalle : 10-16 %). Les largeurs moyennes s'étagent d'environ 5 m (réduit de Chenay) à 9 m (Brimont, Montbré), avec un resserrement systématique au droit des caponnières afin d'augmenter le défilement de ces organes (*e.g.*, 6 m à Montbré). Le linéaire, totalisant 5,5 km, varie logiquement avec la taille des ouvrages (570 m à Chenay, 1 600 m à Nogent-l'Abbesse), avec des tracés incomplets au réduit de Chenay (échelle du fort) et sur les trois batteries annexes du fort de Nogent-l'Abbesse (lunettes est, nord, batterie sud). Les pentes internes s'établissent autour de 13°, avec une variation entre 10 et 16°. Les MNT indiquent un dénivelé du fond de fossé allant de 6 m (réduit de Chenay) à 10 m (fort de Nogent-l'Abbesse ; fig. 5.36A-F), traduisant une inclinaison longitudinale effective, continue ou par tronçons, cohérente avec leur fonction d'évacuation des eaux pluviales (fig. 2.18B, 5.16A).

Altimétriquement, le fond du fossé est en général plus élevé à la gorge qu'au front de tête, sauf à Montbré où le contraste est moindre. Ces résultats doivent cependant être interprétés avec prudence, du fait de trajectoires postérieures ayant vraisemblablement brouillé les états originels (*cf.* partie 6.1.3). Cela s'illustre particulièrement bien au fort de Montbré, utilisé par l'armée jusqu'en 2013, dont le fossé comporte des ruptures de pente brutales utilisées pour des exercices militaires (fig. 5.36F). À l'inverse, le fossé du fort de Saint-Thierry présente une organisation plus symétrique, avec des altitudes maximales à la gorge et à la tête, et des points plus bas aux flancs, disposition qui pourrait davantage refléter l'état d'origine (fig. 5.36B).


A
B
D
100 m
B
C
D
E
100 m
F
G
H
100 m
H

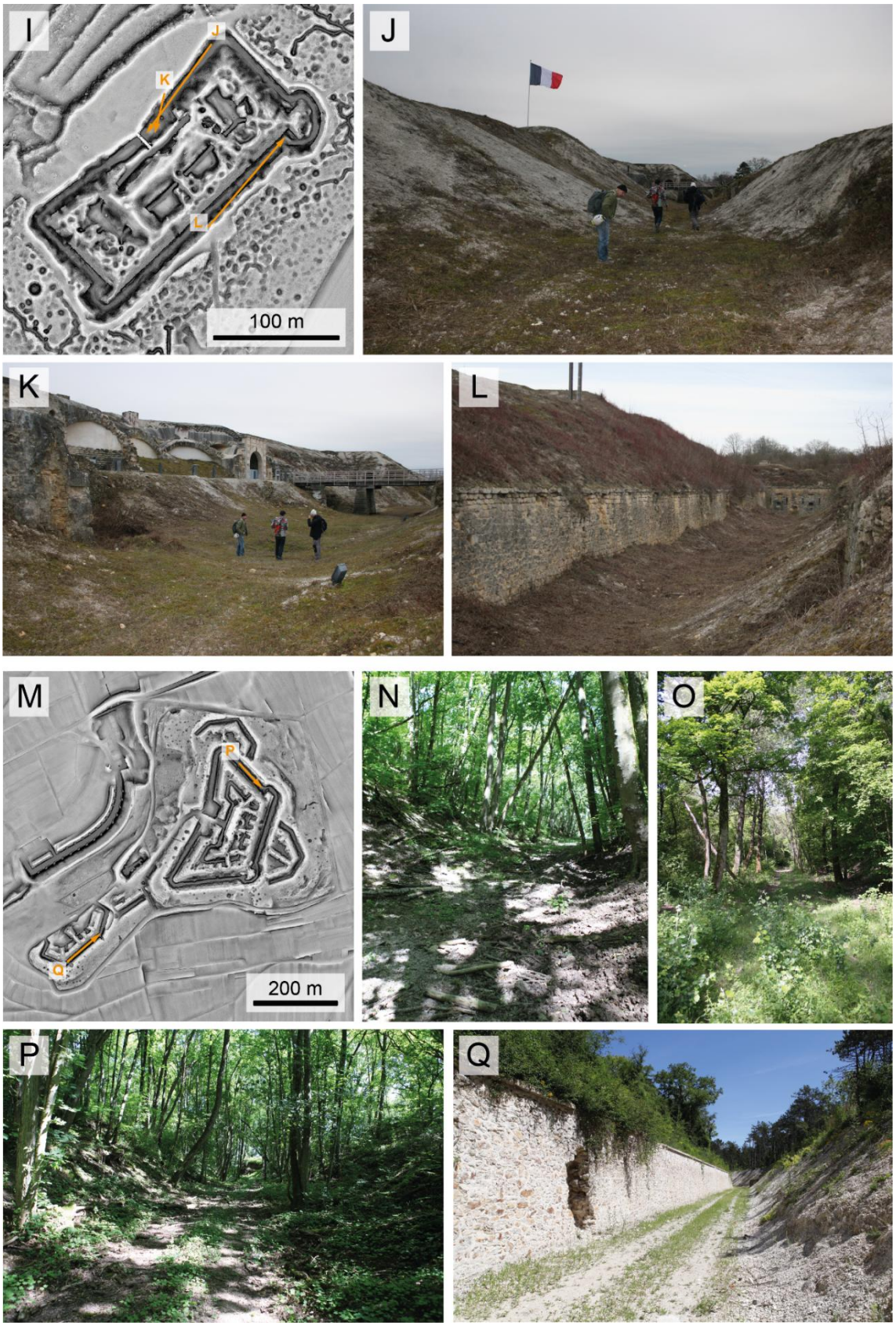


Figure 5.35 : Fossés des forts de la ceinture de Reims présentés à partir du MNT LIDAR HD (2023) traité visuellement (pente + LRM en transparence ; A, E, G, I, M) et de photographies horizontales (B-D, F, H, J-L, N-Q). A-D : Fort de Montbré ; E-F : Fort de Saint-Thierry ; G-H : Fort de Brimont ; I-L : Fort de la Pompelle ; M-Q : Fort de Nogent-l'Abbesse.

Le fossé est bordé de deux talus revêtus à la base afin d'empêcher le franchissement et de retenir la poussée des terres (fig. 5.35A-Q) : l'escarpe (côté fort), destiné à s'opposer à l'escalade, composée de la plongée et du talus extérieur (*cf. supra*, fig. 5.33A-B ; tab. 5.12, 5.13), et la contrescarpe (côté glacis), destiné à compliquer la descente (*cf. infra*).

Nom	Code	S (m²)	P^{rel}	L (m)	l^{moy} (m)	$Pente^{moy}$
Réduit de Chenay	a	2 946	11 %	570	5,2	13,4°
Fort de Saint-Thierry	b	5 511	10 %	830	6,6	15,3°
Fort de Brimont	d	9 155	13 %	1 000	9,2	13,6°
Fort de Nogent-l'Abbesse	j	11 541	13 %	1 600	7,2	13°
Fort de la Pompelle	k	4 220	16 %	675	6,3	14,1°
Fort de Montbré	l	7 023	15 %	821	8,6	10°
Total / moyenne		40 396	13 %	5 496	7,4	13°

Tableau 5.15 : Statistiques relatives aux fossés du groupe G2. L : Linéaire ; l^{moy} : Largeur moyenne ; Moy : Moyenne ; P^{rel} : Part rapportée à la surface totale ; S : Surface totale.

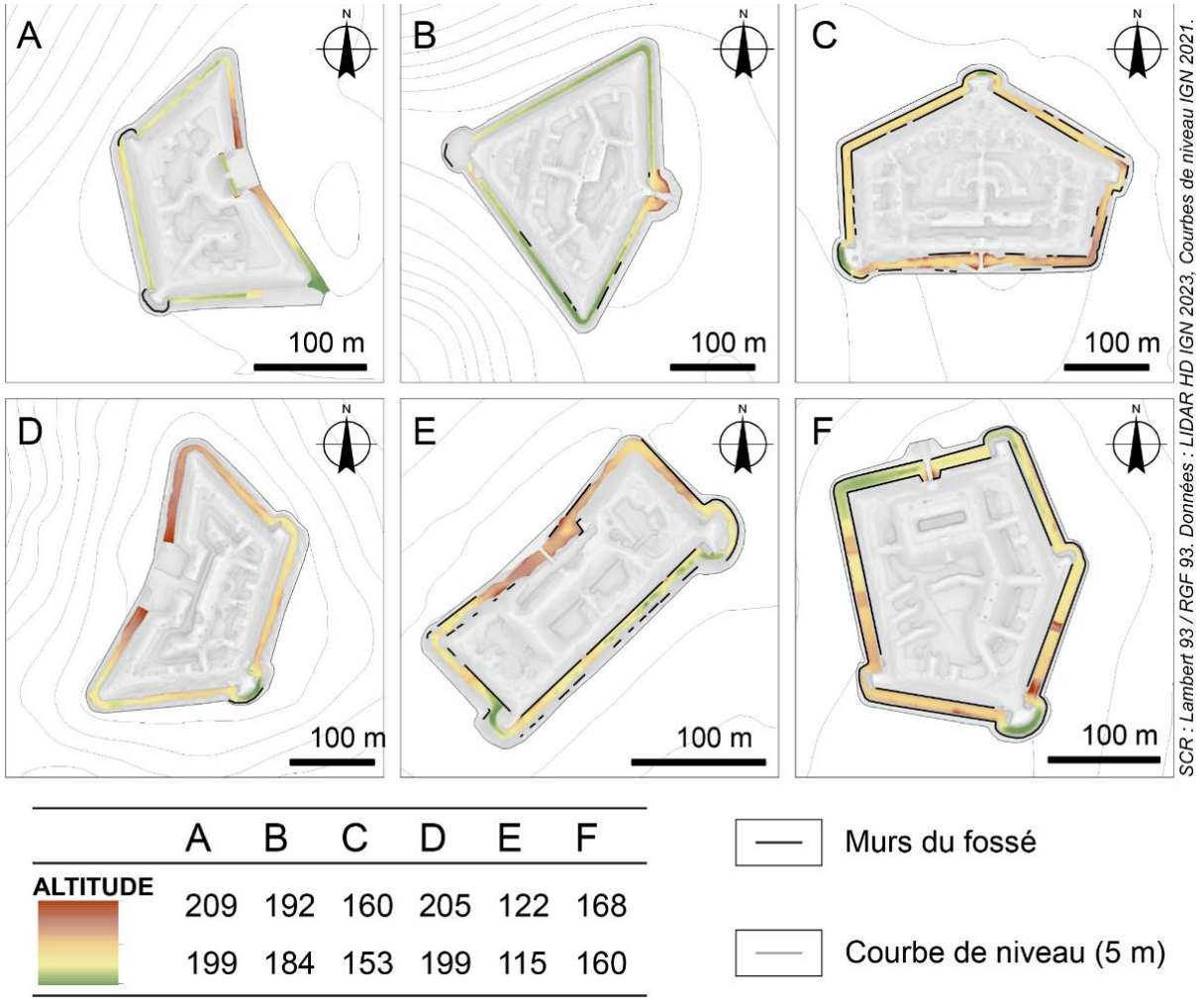


Figure 5.36 : MNT du fossé des forts de la série G2. A : Réduit de Chenay ; B : Fort de Saint-Thierry ; C : Fort de Brimont ; D : Fort de Nogent-l'Abbesse ; E : Fort de la Pompelle ; F : Fort de Montbré.

La cartographie issue du LiDAR montre un linéaire moyen de murs conservés de 590 m (72 m à Chenay, 1 447 m à Montbré) et trois niveaux de persistance (tab. 5.16) :

- les forts où seuls des lambeaux subsistent (Saint-Thierry, 7 % ; Nogent-l'Abbesse, 14 %) ;
- les forts où environ la moitié des murs sont encore en place (forts de la Pompelle et de Brimont) ;
- les ouvrages où la conservation est quasi-intégrale (fort de Montbré, réduit de Chenay).

Dans le cas du réduit de Chenay, ce résultat est à mettre en perspective avec l'absence quasi totale de revêtement originel sur l'escarpe : seuls des murs de contrescarpe subsistent au droit des caponnières (fig. 5.37). Ils sont surmontés de grilles, mesure rendue nécessaire par l'étroitesse du fossé afin d'interdire l'emploi de ponts volants lors d'une attaque (Simoutre, 1889a).

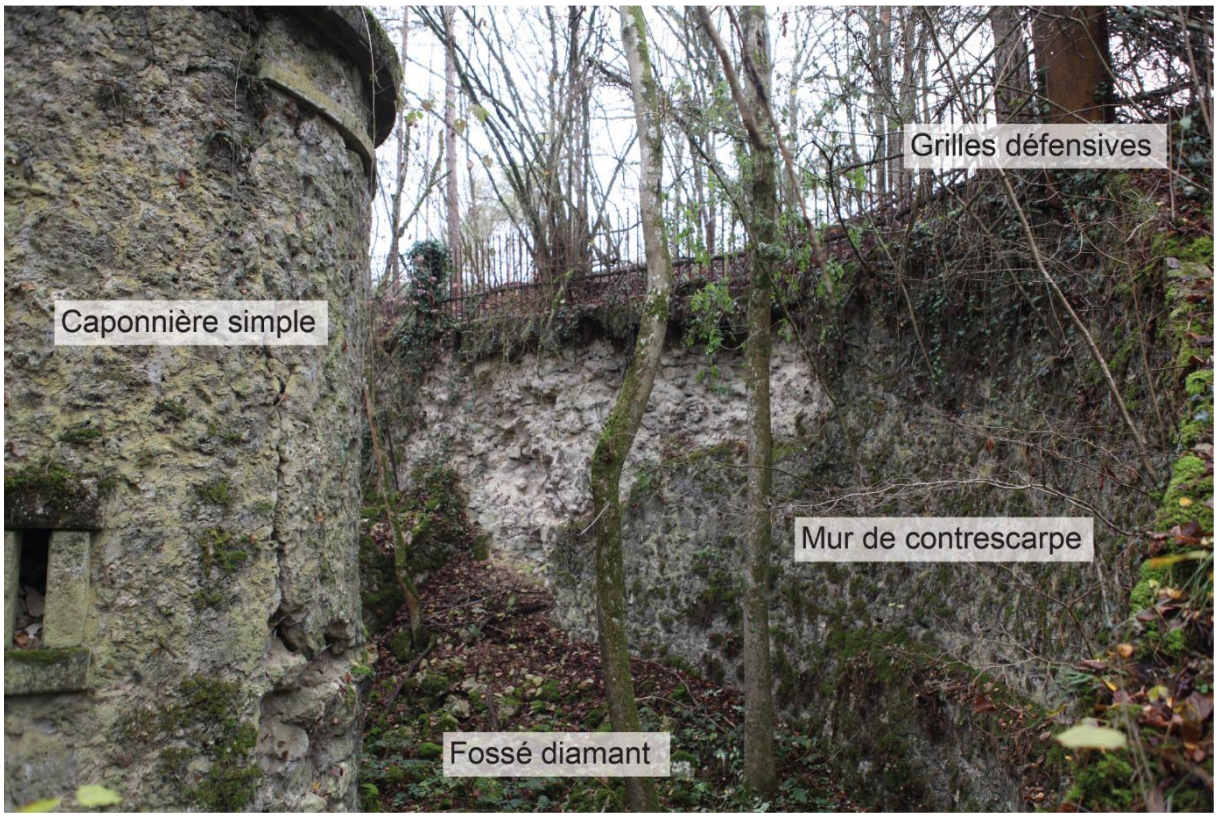


Figure 5.37 : Mur de contrescarpe maçonné et grille défensive sommitale face à la caponnière simple du réduit de Chenay.

Nom	Code	L murs (m)	Type d'escarpe
Réduit de Chenay	a	72 / 72 (100 %)	Non revêtue (grilles défensives)
Fort de Saint-Thierry	b	116 / 1 677 (7 %)	Attachée (?)
Fort de Brimont	d	1 055 / 1 748 (60 %)	Demi-détachée (attachée à la gorge)
Fort de Nogent-l'Abbesse	j	276 / 1 911 (14 %)	Détachée
Fort de la Pompelle	k	575 / 1 212 (47 %)	Attachée
Fort de Montbré	l	1 447 / 1 447 (100 %)	Demi-détachée
Moyenne		55 %	

Tableau 5.16 : Linéaire de murs du fossé cartographié et type d'escarpe. L : Linéaire.

Les quatre variantes d'escarpe décrites par la doctrine sont représentées dans les forts de la série G2 (fig. 5.38A-D ; *cf.* partie 2.4.2 ; Simoutre, 1889a) :

- Escarpe attachée : attestée au fort de la Pompelle (fig. 5.35L, 5.38A), ainsi qu'à la batterie sud-ouest du fort de Nogent-l'Abbesse (fig. 5.35Q).
- Escarpe demi-détachée : bien lisible à Montbré en photo (fig. 5.38B) et en coupe (fig. 5.15L) avec un mur bas surmonté d'un mur détaché crénelé et d'un chemin des rondes ; fig. 5.39A-C) ; les indices planimétriques et photographiques suggèrent cette formule sur les faces de tête de Brimont.

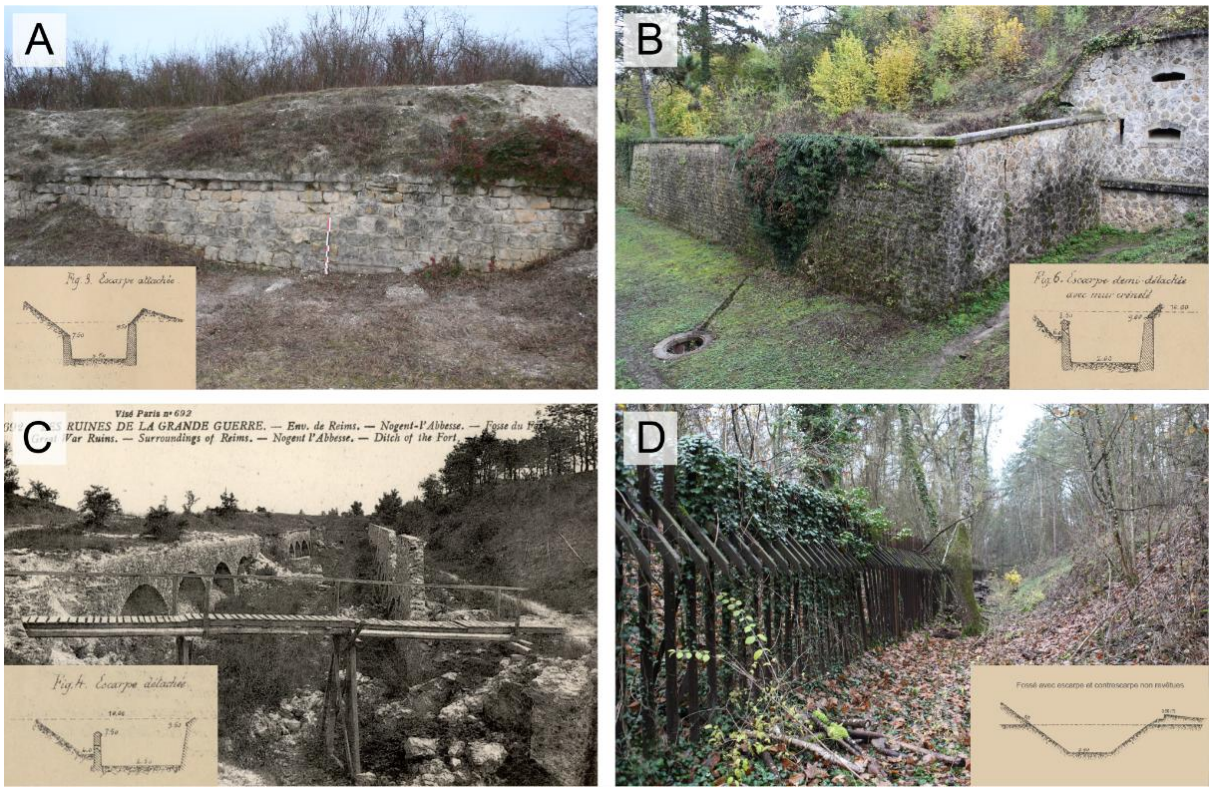


Figure 5.38 : Typologie des murs d'escarpe selon Simoutre (1889b). A : Escarpe attachée du fort de la Pompelle ; B : Escarpe demi-détaché du fort de Montbré ; C : Escarpe détachée du fort de Nogent-l'Abbesse (source : Europeana) ; D : Escarpe et contrescarpe non revêtues (à terres coulantes) avec grilles défensives du réduit de Chenay.

- Escarpe détachée : des indices photographiques existent pour le fort de Nogent-l'Abbesse, mais l'état actuel ne permet pas d'en observer actuellement (fig. 5.38C, 5.40).
- Non revêtue (à terres coulantes) : cas du réduit de Chenay où subsistent les grilles défensives d'origine remplaçant le mur (fig. 5.38D).

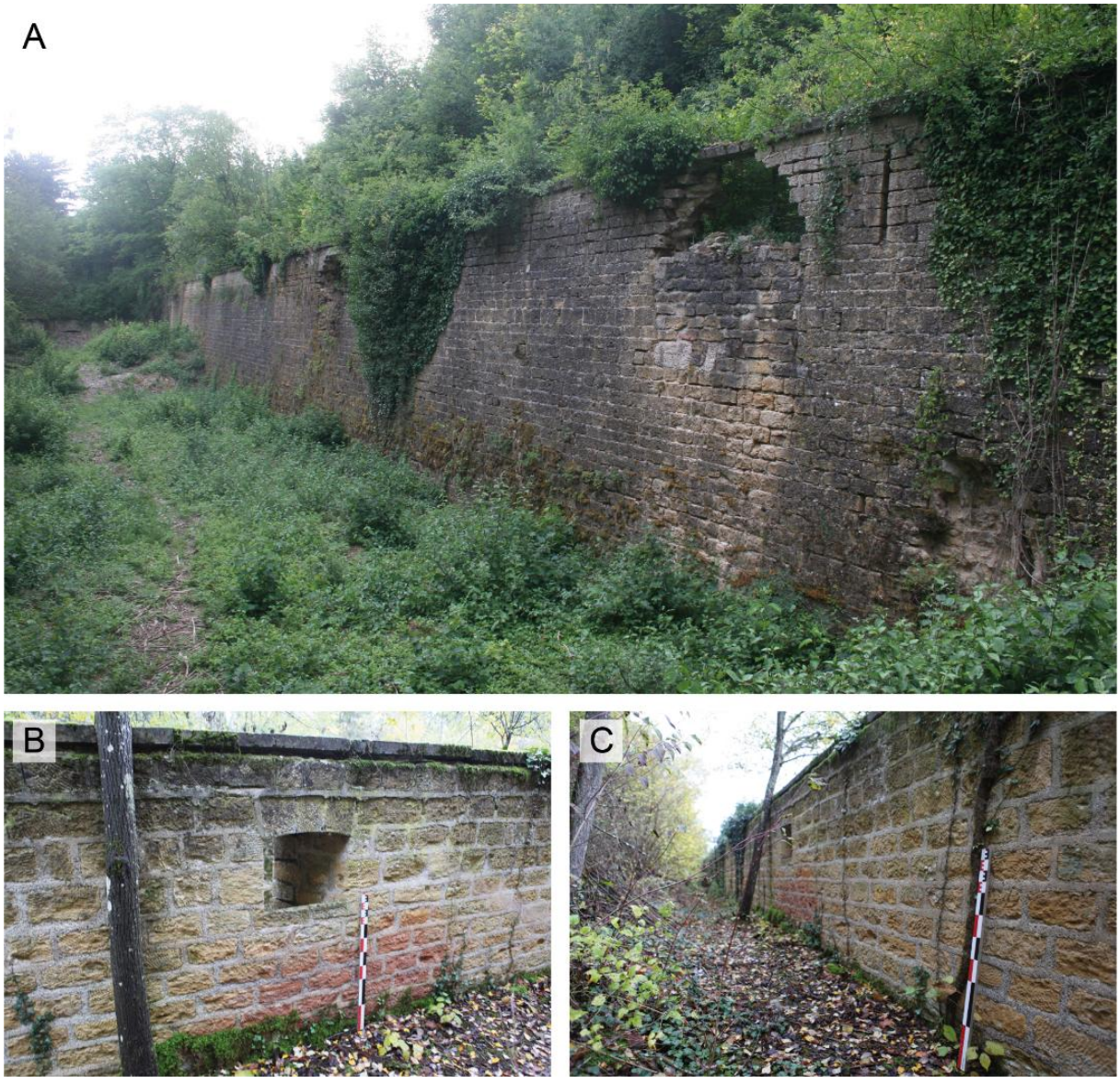


Figure 5.39 : Escarpe demi-détachée du fort de Montbré. A : Mur d'escarpe vu depuis le fossé dont les effondrements laissent transparaître le chemin des rondes ; B : Créneau d'infanterie vu depuis le chemin des rondes ; C : Mur d'escarpe vu depuis le chemin des rondes.

Dans le cas des escarpes attachées, les murs pouvaient être construits pleins ou allégés par des arceaux de décharge, tel qu'observé sur le mur de contrescarpe du fort de Nogent-l'Abbesse (fig. 5.40), afin de réduire la poussée exercée par le rempart. Ce principe d'arceaux, bien que typiquement associé aux escarpes attachées, a pu être employé

ponctuellement dans des variantes détachées ou demi-détachées, en fonction de la nature du terrain et des contraintes locales (annexe 46).

À ce titre, l'emploi d'escarpes détachées ou demi-détachées implique l'existence d'environ 4 000 m² de chemins de ronde : 2 200 m² au fort de Nogent-l'Abbesse et 1 800 m² au fort de Montbré. Ces circulations pouvaient être reliées au reste de l'ouvrage par des escaliers partant des caponnières (annexe 47). Au fort de Brimont, si de petits replats subsistent en contrehaut des escarpes de flanc et de tête, aucune signature morphologique nette n'autorise à identifier formellement un tel chemin.

Un cas particulier est représenté par les fossés creusés directement dans des affleurements rocheux, comme aux forts de Brimont (fig. 5.41A) ou Saint-Thierry (fig. 5.41B). Lorsque la roche est suffisamment résistante, elle peut tenir lieu de soutènement naturel, au prix d'un façonnage vertical ou subvertical (Simoutre, 1889a), comme le suggère possiblement la paroi de sables grésifiés thanétiens sur la contrescarpe du fossé de gorge du fort de Brimont (fig. 5.41A). Dans les cas moins favorables, elle est recouverte d'un placage de maçonnerie mince ou consolidée par des contreforts ponctuels (fig. 5.42A-C).

Les types d'escarpe ainsi présentés, mentionnés dans le tableau 5.16, renseignent sur un mode dominant. Mais il convient de bien noter qu'un seul type d'escarpe n'est pas forcément affilié à chaque fort, cette dernière pouvant varier selon les besoins défensifs. Le cas du fort de Brimont l'illustre, avec la présence avérée de murs d'escarpes demi-détachés sur les faces de tête et de flanc et attachés sur la gorge (fig. 5.43A-D).



Figure 5.40 : Fossé et de la face 1-2 et lunette nord du fort de Nogent-l'Abbesse (source : Philippe Tourtebatte, date inconnue).

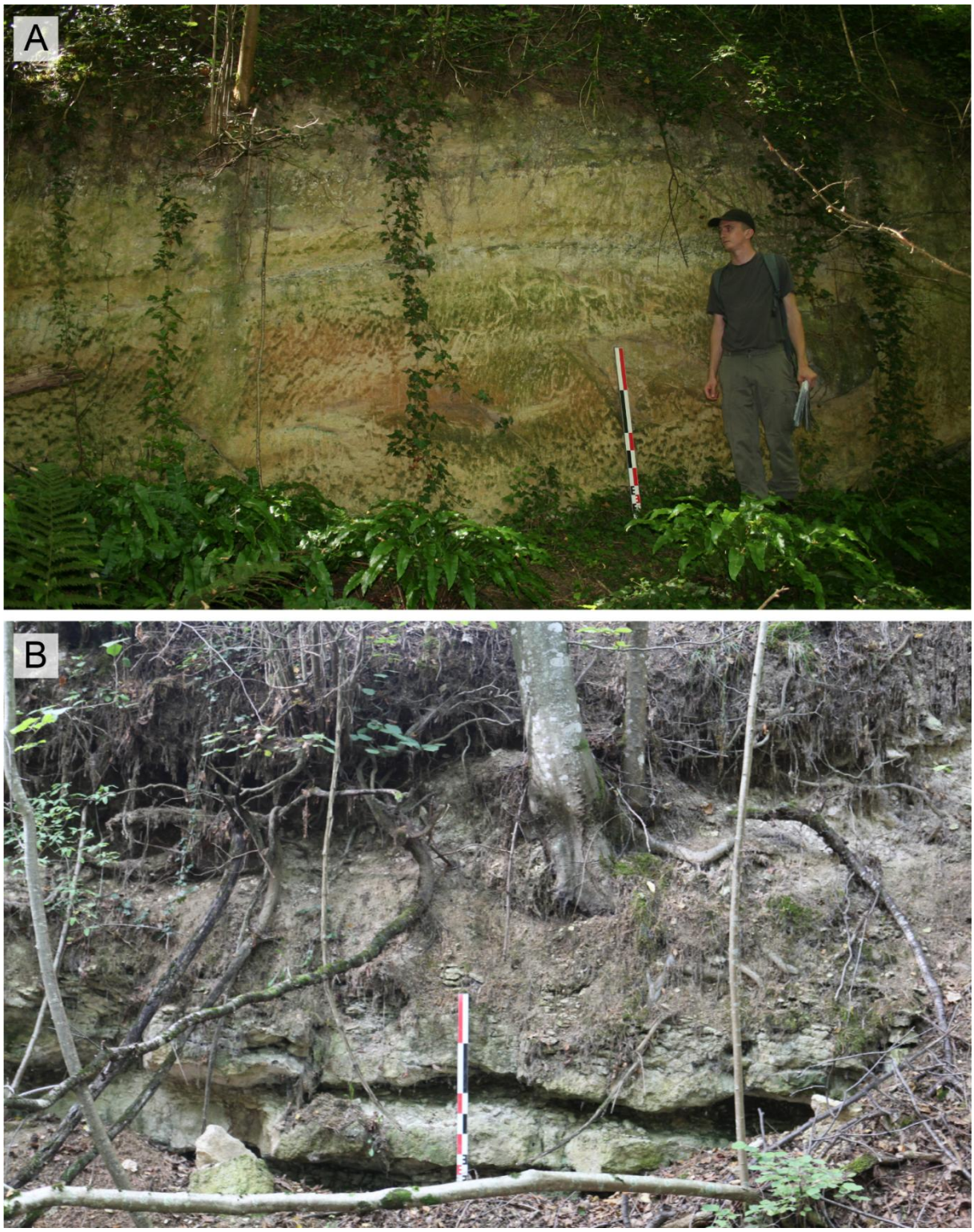


Figure 5.41 : Affleurements rocheux dans le fossé. A : Affleurement de sables grésifiés en contrescarpe du front de gorge du fort de Brimont ; B : Affleurement de calcaires lutétiens coquilliers dans le fossé du fort de Saint-Thierry.

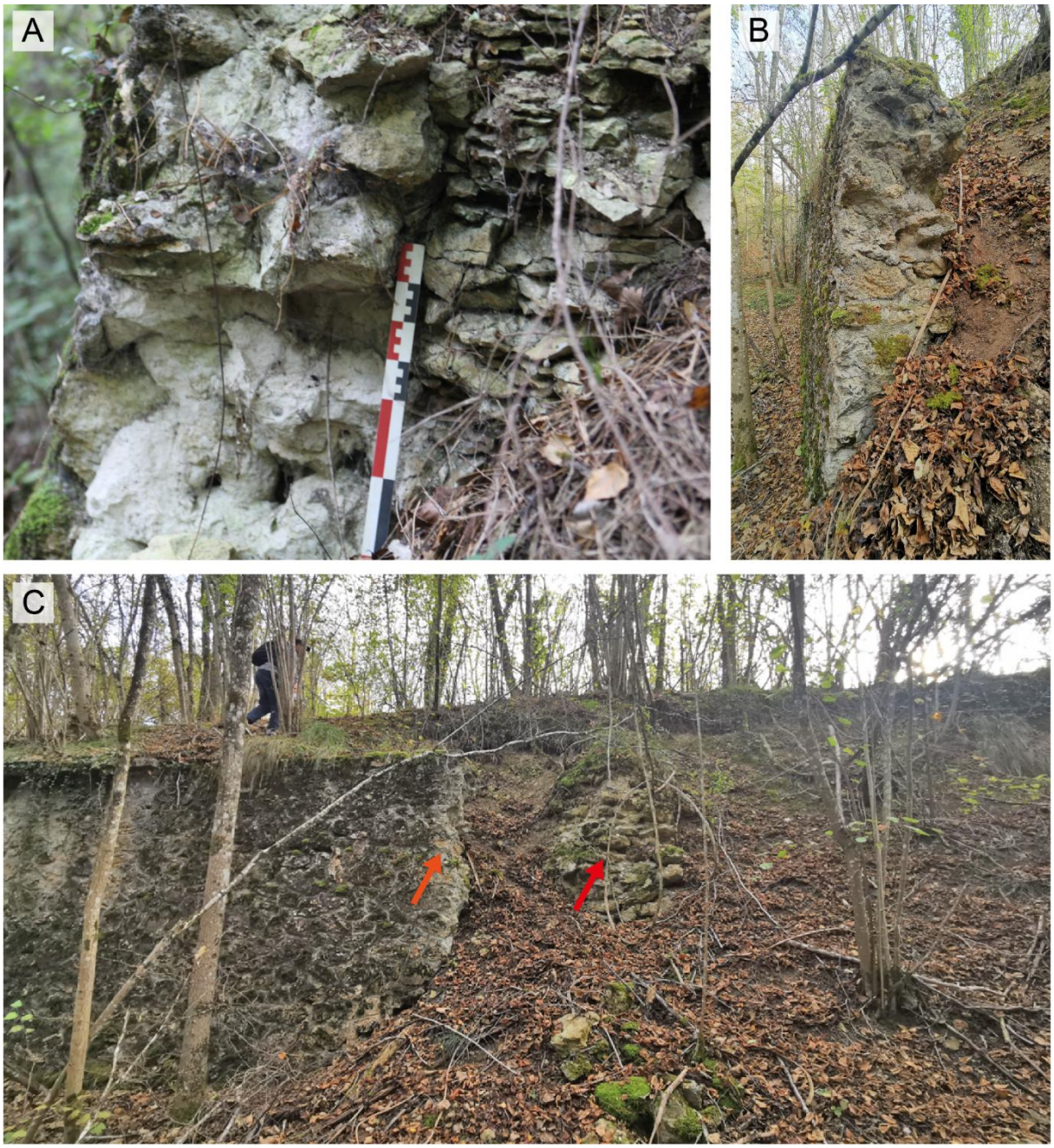


Figure 5.42 : Mur de contrescarpe du fort de Saint-Thierry. A : Placage de maçonnerie reposant directement sur le calcaire affleurant ; B : Lambeau de faible épaisseur du mur de contrescarpe du front de gorge du fort de Saint-Thierry ; C : Contrefort maçonné situé en arrière dans le talus (flèche rouge) placé à proximité du lambeau de mur de la vignette B (flèche orange ; cl : Alain Devos).

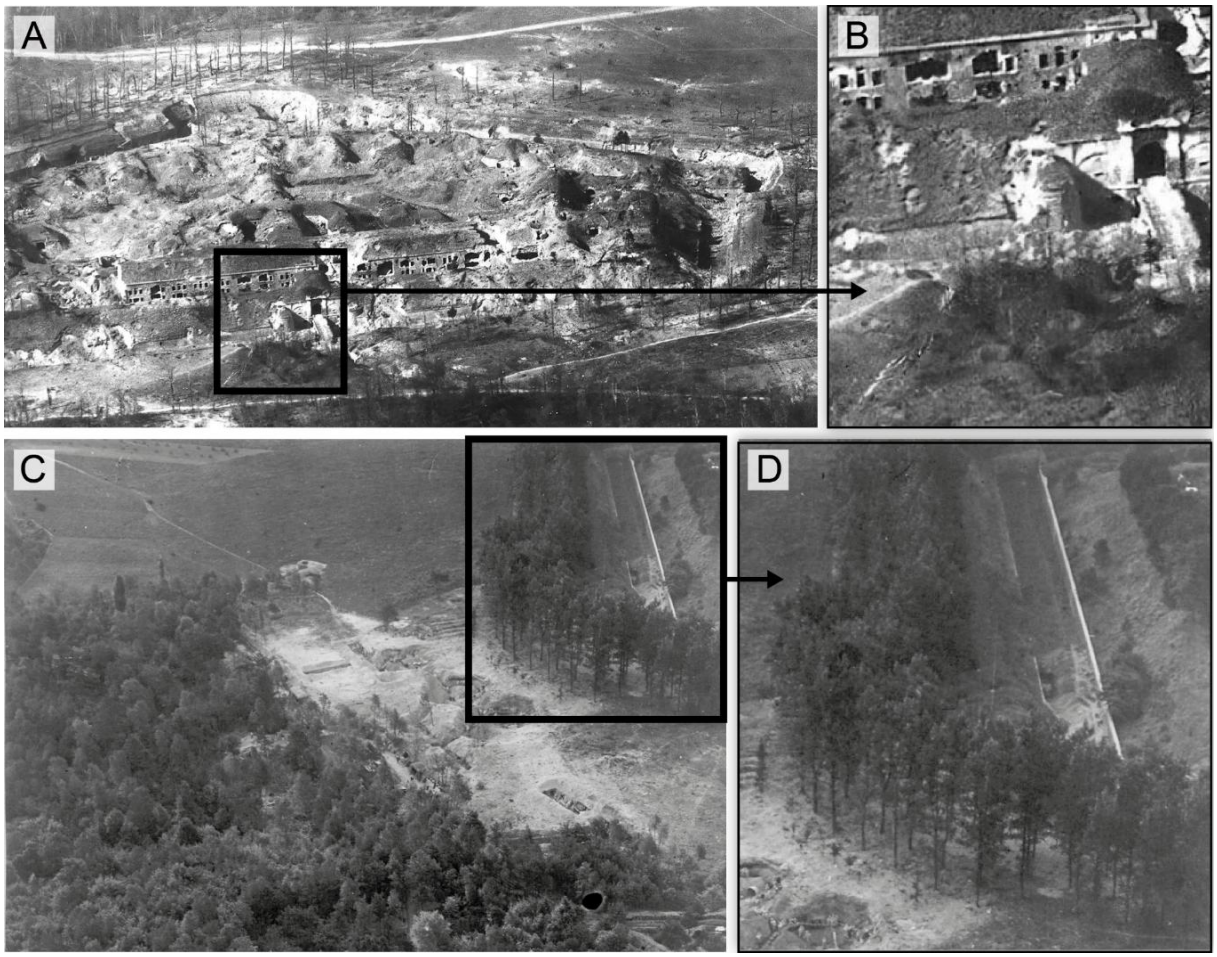


Figure 5.43 : Photographies anciennes du fort de Brimont montrant un mur d'escarpe tantôt attaché (A-B), tantôt détaché (C-D). A-B : aérienne oblique, 5 mai 1917 à 16 h (avion, escadrille C 64, 600 m d'altitude ; fonds Fouqueray) ; C-D : aérienne oblique, 8 août 1913 à 7h30 (dirigeable ; SHD, GR 2 V 120).

iii) Contrescarpe

Opposée à l'escarpe, la contrescarpe, circonscrivant l'extérieur du fossé, correspond au talus raide reliant le glacis (crête extérieure) au fond du fossé (ou plafond) destiné à compliquer l'exploitation de brèches éventuelles dans le rempart.

Nom	Code	S (m²)	P^{rel}	$Pente^{moy}$
Réduit de Chenay	a	2 858	11	30,6
Fort de Saint-Thierry	b	7 032	13	34,8
Fort de Brimont	d	6 691	10	35,5
Fort de Nogent-l'Abbesse	j	11 458	13	30,3
Fort de la Pompelle	k	4 002	15	33,8
Fort de Montbré	l	3 810	8	41
Moyenne		35 851	12	34

Tableau 5.17 : Statistiques relatives aux contrescarpes. Moy : Moyenne ; P^{rel} : Part rapportée à la surface totale ; S : Surface totale.

La digitalisation des contrescarpes des ouvrages du groupe G2 aboutit à une surface cumulée de 35 850 m², soit en moyenne environ 6 000 m² par fort, allant de 2 858 m² au réduit de Chenay à plus de 11 458 m² au fort de Nogent-l'Abbesse (tab. 5.17). Rapportée à la superficie totale des forts, l'occupation par la contrescarpe représente en moyenne 12 %, avec une

variabilité comprise entre 8 % au fort de Montbré à 15 % au fort de la Pompelle.

La transition avec le glacis s'effectue fréquemment par un chemin couvert d'environ 6 m de largeur, offrant à la fois une bande terrassée de circulation pédestre et une crête d'infanterie (Simoutre, 1889a). La pente moyenne des contrescarpes est de l'ordre de 34°, résultant de la combinaison entre le talus (*c.* 75° lorsqu'il est maçonné) et le chemin couvert (*c.* 30-40° ; fig. 2.18B).

Une corrélation nette apparaît entre la pente mesurée et l'état de préservation des revêtements :

- Ouvrages de Nogent-l'Abbesse (30,3°) et de Chenay (30,6°) : des murs de contrescarpe en regard des caponnières subsistent (fig. 5.37, 5.44) ;
- Forts de la Pompelle (33,8°) et de Brimont (35,5°), où environ la moitié des murs est conservée (fig. 5.35H, L) ;
- le fort de Montbré (41°) où l'intégralité des bords des fossés demeure maçonnée (tab. 5.16 ; fig. 5.35B-D).



Figure 5.44 : Mur de contrescarpe à arceaux de décharge en face de la caponnière double du fort de Nogent-l'Abbesse.

Le fort de Saint-Thierry constitue une exception car l'excavation dans des affleurements calcaires lutétiens résistants a limité les processus de régularisation postérieurs à la disparition des maçonneries (fig. 5.41B ; *cf.* partie 6.1.3.3). Les parois conservent ainsi des profils abrupts, traduisant un contrôle lithologique qui contraste avec les formes plus adoucies observées dans les autres fossés lorsque les revêtements ont disparu (fig. 5.15A-L).

Après l'analyse des organes de défense passive (glacis, fossé, murs), il convient désormais d'aborder les dispositifs de défense active, qui ne se limitent pas à freiner l'assaillant en battant par les feux le fossé et ses abords. Ils correspondent à des caponnières (volumes saillants dans le fossé) qui en constituent l'exemple le plus emblématique, à des ouvrages construits en avant de l'entrée du fort (ravelin) et à des replats terrassés aménagés dans le rempart (bonnettes).

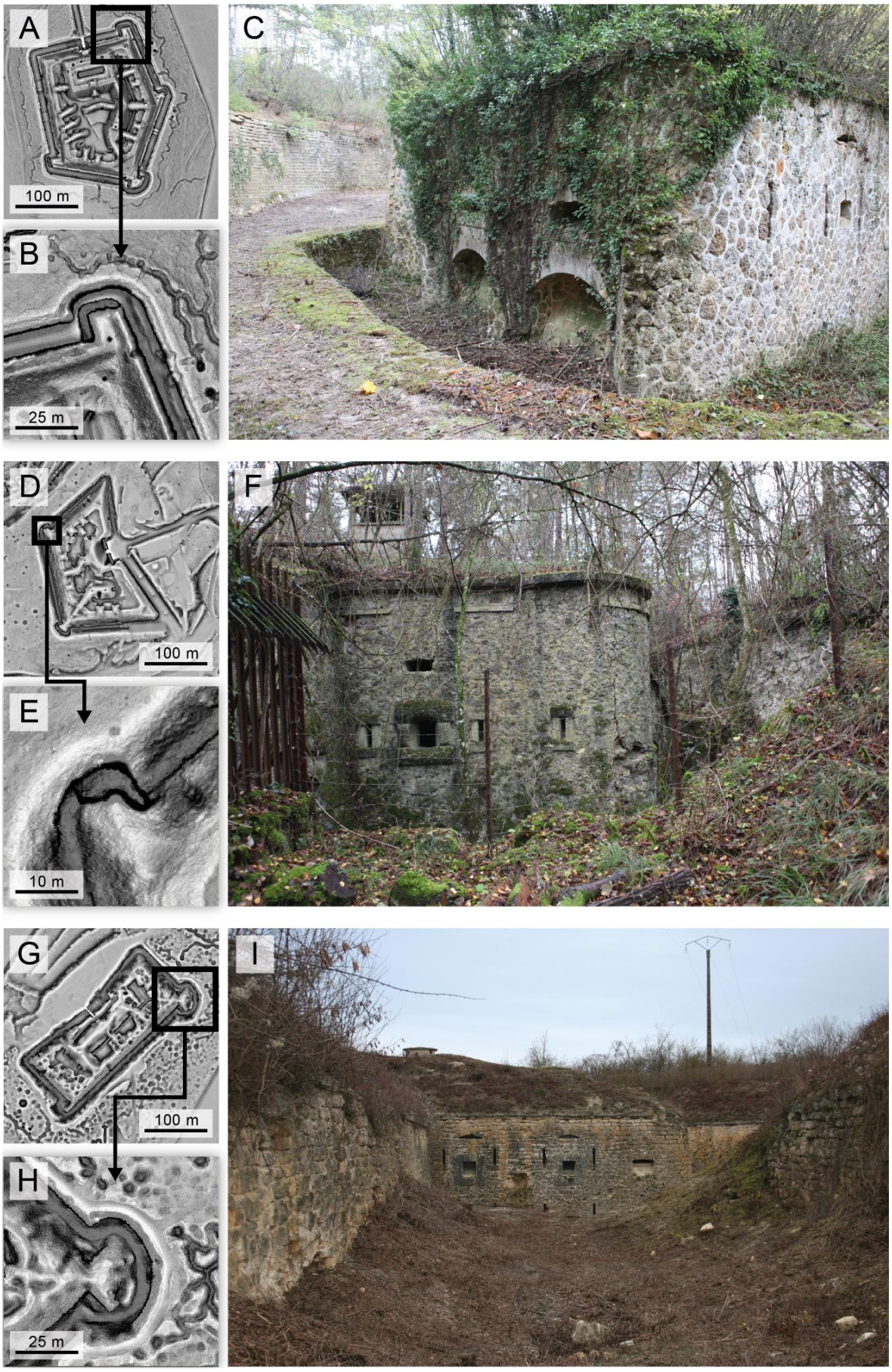
iv) Caponnières

Les caponnières sont des constructions voutées à l'épreuve adossées à l'escarpe afin de flanquer longitudinalement le fossé par l'intermédiaire d'artillerie légère et d'armement contre l'infanterie. Comme le reste des substructures des forts, leur protection s'effectue par le défilement aux coups dangereux ainsi que par l'emploi d'une couverture plurimétrique de terre, correspondant à la masse visible au LiDAR (fig. 5.45A-N).

La digitalisation des caponnières du groupe G2 aboutit à une surface cumulée de 4 123 m², soit en moyenne environ 690 m² par fort (tab. 5.18). Les valeurs varient fortement, allant de faibles surfaces, comme au réduit de Chenay (198 m²) à des ensembles plus développés comme à Brimont (*c.* 1 400 m²). Rapportée à la superficie totale des forts, la part des caponnières demeure modeste, autour de 1 à 2 % en moyenne, confirmant leur statut d'organes ponctuels, spécialisés et fortement contraints par la géométrie du fossé.

Nom	Code	Nb. réel	S (m²)	S^{min} (m²)	S^{max} (m²)	S^{moy} (m²)	P^{rel}
Réduit de Chenay	a	2	198	38	160	99	0,8
Fort de Saint-Thierry	b	0	/	/	/	/	/
Fort de Brimont	d	3	1398	198	612	466	2
Fort de Nogent-l'Abbesse	j	2	984	242	742	492	1,1
Fort de la Pompelle	k	1	488	488	488	488	1,9
Fort de Montbré	l	4	1055	108	485	264	2,2
Total / Moyenne		12	687	179	415	302	1,3

Tableau 5.18 : Statistiques relatives aux caponnières du groupe G2. Nb : Nombre ; P^{rel} : Part rapportée à la surface totale ; S : Surface totale ; S^{max} : Surface maximale ; S^{min} : Surface minimale ; S^{moy} : Surface moyenne.


A
100 m
B
25 m
C
D
100 m
E
10 m
F
G
100 m
H
25 m
I

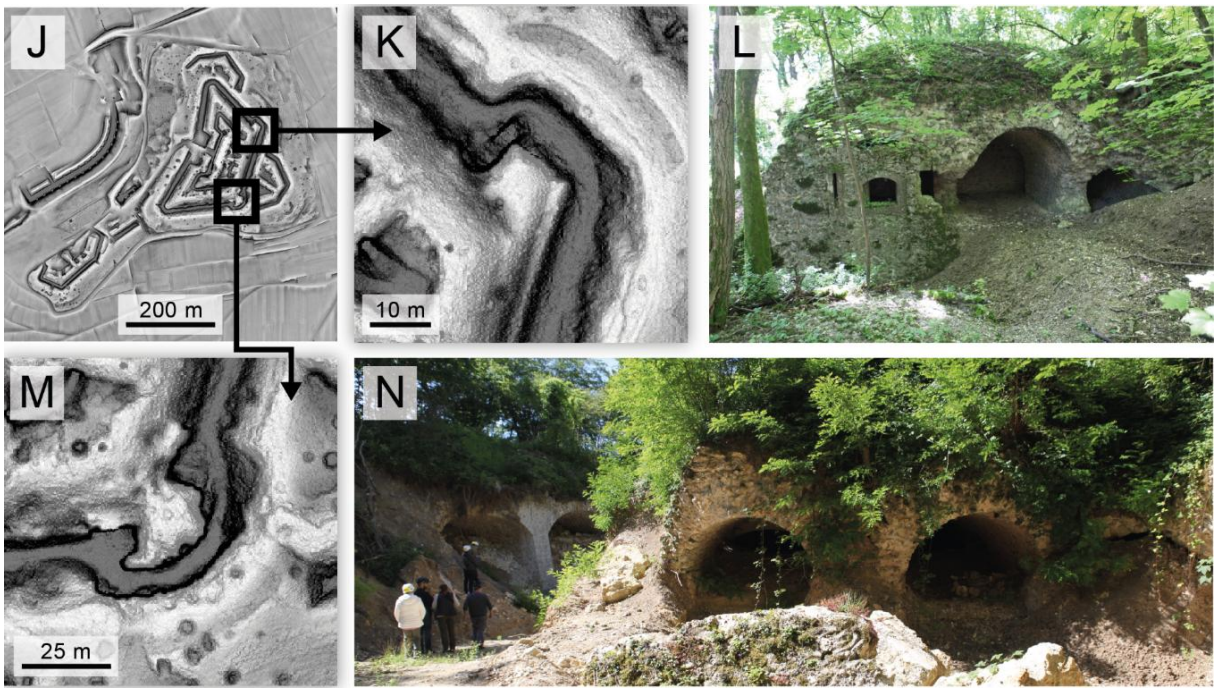


Figure 5.45 : Caponnières d'ouvrages de la ceinture de Reims présentés à partir du MNT LIDAR HD (2023) traité visuellement (pente + LRM en transparence ; A-B, D-E, G-H, J-K, M) et de photographies horizontales (C, F, I, L, N). A-C : Fort de Montbré ; D-F : Réduit de Chenay ; G-I : Fort de la Pompelle ; J-N : Fort de Nogent-l'Abbesse.

La variabilité inter- et intra-forts est principalement fonction de la surface de l'enceinte, de sa forme et du type de caponnière. Le nombre de caponnières augmente avec la surface et le nombre de saillants (fig. 5.11 ; tab. 5.2). Les forts pentagonaux convexes de Montbré et Brimont possèdent ainsi au moins trois caponnières et les plus fortes superficies relatives à ces organes de défense. À l'inverse, les ouvrages pentagonaux concaves subtrapézoïdaux de Chenay, Nogent-l'Abbesse et la Pompelle n'en comptent que deux ou moins, ce dernier ayant notamment perdu l'une de ses caponnières pendant la Première Guerre mondiale.

Deux types de caponnières sont visibles au LiDAR. Les caponnières doubles flanquent deux directions perpendiculaires par l'intermédiaire d'embrasures. Tous les forts de Reims en possèdent au moins une à l'origine, à l'exception de la vigie de Berru (fig. 5.6A-L). Les fortifications de la série G2 en comprennent aujourd'hui six, dont deux au fort de Brimont, sauf le fort de Saint-Thierry du fait d'un démantèlement au milieu du XXe siècle à vocation d'extraction de pierres (*cf.* partie 6.1.1.3). Ces organes sont placés préférentiellement sur la face de tête pour les forts pentagonaux concaves (*e.g.*, fig. 5.45H, M) et sur le saillant de tête pour les forts pentagonaux convexe, la caponnière double flanquant la gorge du fort de Brimont constituant une exception (fig. 5.46A-D).

En parallèle, six caponnières simples, également appelées demi-caponnières ou ailerons car ne flanquant qu'une direction, se répartissent au sein du réduit de Chenay (fig. 5.45D-F) et des forts de Brimont, Nogent-l'Abbesse (fig. 5.45J-L) et Montbré (fig. 5.45A-C), le fort de

Saint-Thierry n'en ayant jamais possédé et celle du fort de la Pompelle n'étant plus lisible topographiquement (fig. 5.22A-F). Leur implantation se situe généralement aux angles d'épaule, à l'exception d'un exemple placé au droit du fossé de gorge au fort de Montbré, qui possède par ailleurs trois autres caponnières.

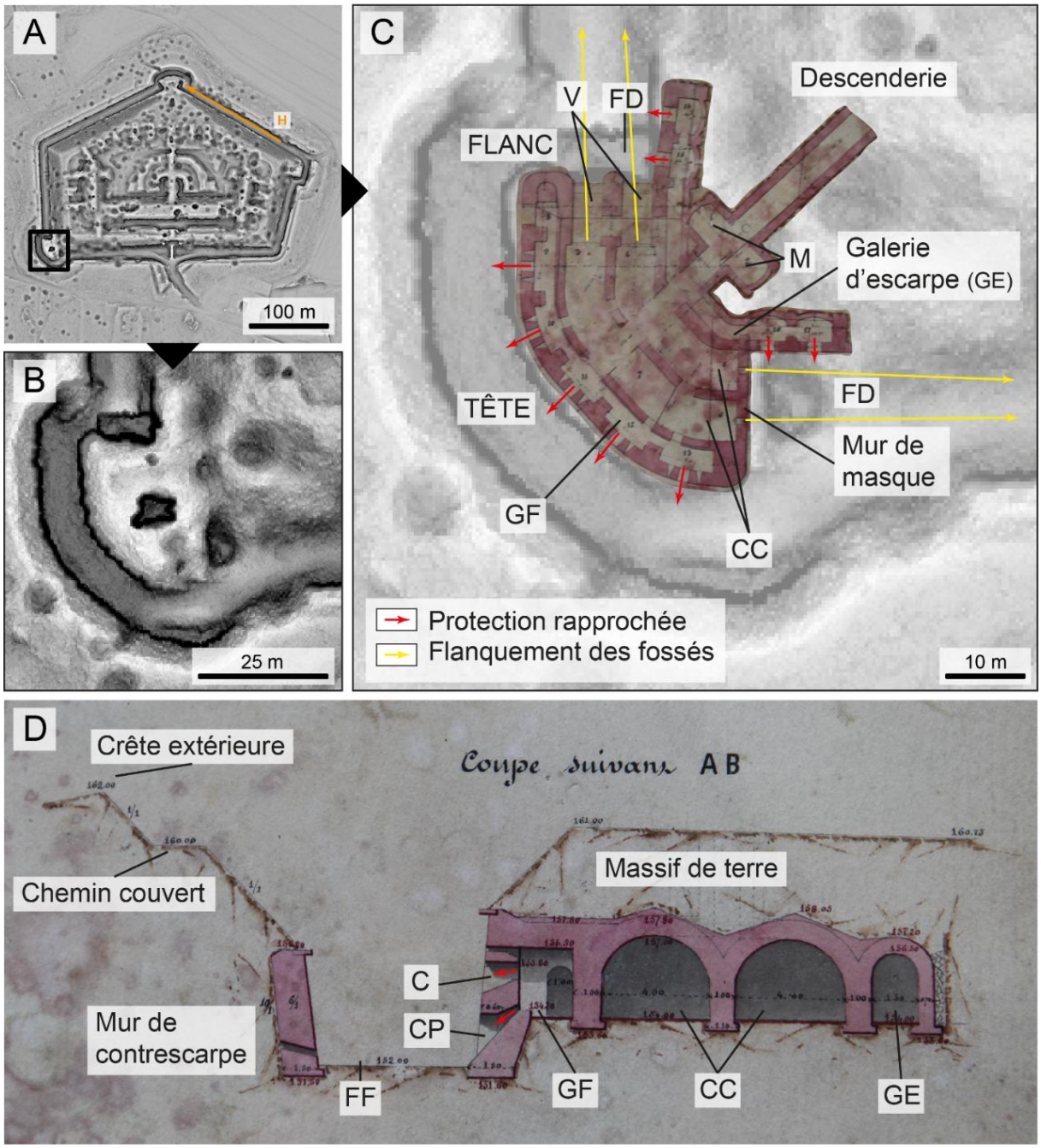


Figure 5.46 : Caponnière double d'épaule du fort de Brimont. A : MNT LIDAR HD (2023) traité visuellement (pente + LRM en transparence) du fort de Brimont ; B : Agrandissement sur la caponnière ; C : Plan de la structure bâtie dessiné en 1880 (SHD, GR 4 V T 346 1) ; D : Coupe réalisée en 1880 (SHD, GR 4 V T 346 1). C : Créneau de tir ; CP : Créneau de pied ; CC : Casemate à canon ; FD : Fossé diamant ; GE : Galerie d'escarpe ; GF : Galerie de fusillade ; FF : Fond du fossé ; M : Magasin ; V : Visière.

Le cas du fort de Saint-Thierry est doublement singulier puisqu'outre la disparition de sa caponnière double de tête, il s'agit du seul ouvrage de la ceinture rémoise à avoir compté une caponnière de gorge constituant l'entrée, mais aujourd'hui partiellement démantelée et peu perceptible au LiDAR (fig. 5.47A-B).

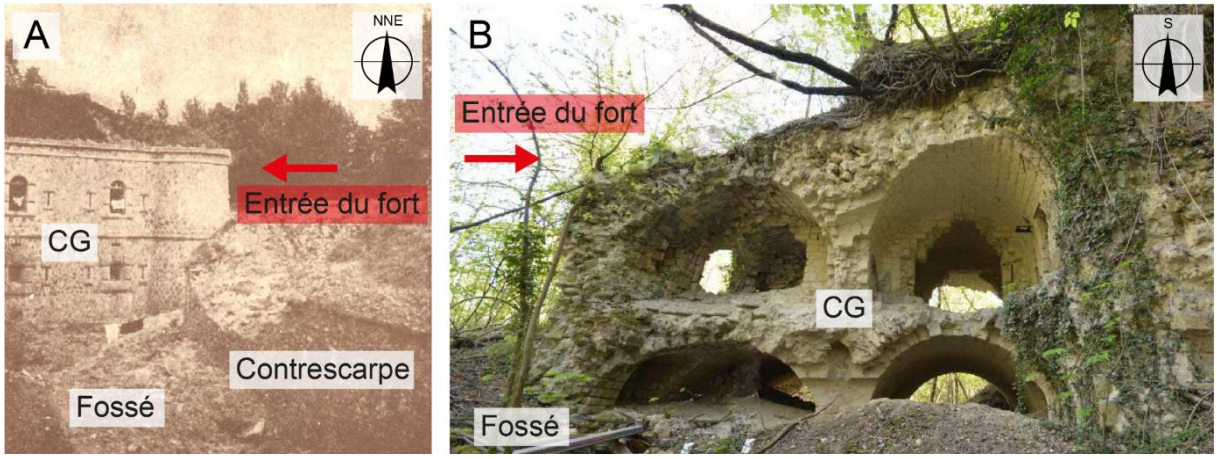


Figure 5.47 : Photographies horizontales de la caponnière de gorge (CG ; ou « en oreilles de chat ») à double étage du fort de Saint-Thierry (cl : Olivier le Tinnier, Mémoire et Fortifications). A : Caponnière intacte, probablement pendant l'entre-deux-guerres ; B : Vestiges actuels de la caponnière.

L'exemple de la caponnière double d'épaule du fort de Brimont (fig. 5.46A-D) permet d'illustrer l'organisation interne de ces structures. L'ouvrage se compose d'une succession de quatre berceaux parallèles à l'escarpe, fermés latéralement par des murs de masque percés de créneaux (armes légères) et d'embrasures (artillerie), disposées assez haut pour rester fonctionnels en cas d'éboulement (au moins 1,5 m ; Simoutre, 1889a). L'accès se fait par une descenderie interne reliant la caponnière à l'intérieur du fort, à laquelle sont adjoints deux petits magasins (approvisionnement, logement du personnel) situés à l'intersection avec l'entrée de la caponnière. Les deux berceaux centraux correspondent aux casemates d'artillerie vouées à flanquer longitudinalement les fossés. Sur les flancs les plus exposés, ces casemates peuvent être prolongées par des visières, structures voûtées formant un tunnel suffisamment long pour protéger les embrasures, comme observé sur le flanc nord de la caponnière (fig. 5.46C) ou au fort de Nogent-l'Abbesse (fig. 5.45M-N). La protection rapprochée de la tête de l'organe est assurée par une galerie de fusillade, percée de créneaux horizontaux et de pied permettant l'élimination des angles morts. Cette galerie peut se prolonger par un orillon, c'est-à-dire une saillie pleine destinée à protéger les flancs de la structure, à l'image des caponnières de tête des forts de Nogent-l'Abbesse (fig. 5.45M) et de Montbré (fig. 5.45A). Une galerie analogue est parfois intégrée à l'escarpe de part et d'autre, de manière à flanquer les embrasures des casemates d'artillerie. L'ensemble est recouvert d'au moins 3 m de matériaux terreux, assurant le blindage final de la structure (fig. 5.46D).

L'organisation des caponnières simples est globalement similaire. La principale différence tient à la protection de la face aveugle, qui repose sur une masse de terre atteignant au minimum 6 m d'épaisseur horizontale, destinée à résister aux coups d'artillerie tirés depuis l'arrière (Simoutre, 1889a).

v) Fossés diamants

Dans les deux types de caponnières, la protection assurée par les galeries d'escarpe est systématiquement renforcée par un fossé surcreusé, appelé fossé diamant. Ces excavations mesuraient généralement environ quatre mètres de largeur pour une profondeur avoisinant 1,5 m, sur une longueur équivalente à celle des casemates d'artillerie qu'elles flanquent (fig. 5.46B-C). La cartographie de ces fossés a permis d'identifier quatorze entités totalisant 1 144 m² (tab. 5.19). L'éventail des surfaces varie de 56 m² au fort de la Pompelle, où subsiste une dépression en avant d'une caponnière double, à 395 m² au fort de Montbré, seul ouvrage où aucun fossé n'a été effacé. Les forts de Brimont, Chenay et Nogent-l'Abbesse se situent dans une fourchette comprise entre 200 et 300 m². Le cas du réduit de Chenay se distingue par une occupation totale de la largeur du fossé, tandis que le fort de Saint-Thierry, dépourvu de caponnière, ne conserve plus de fossé diamant. Dans certains cas, comme aux forts de Montbré et de Nogent-l'Abbesse, les caponnières simples bénéficient en outre d'un fossé diamant en équerre, renforçant également la défense rapprochée au niveau de la galerie de fusillade.

Nom	Code	Nb. réel	S (m²)	S^{min} (m²)	S^{max} (m²)	S^{moy} (m²)	P^{rel}
Réduit de Chenay	a	2	280	87	193	140	1,1
Fort de Saint-Thierry	b	0	/	/	/	/	/
Fort de Brimont	d	5	215	30	56	43	0,3
Fort de Nogent-l'Abbesse	j	1	198	198	198	198	0,2
Fort de la Pompelle	k	1	56	56	56	56	0,2
Fort de Montbré	l	5	395	28	129	79	0,8
Total / Moyenne		14	1 144	67	105	86	0,4

Tableau 5.19 : Statistiques relatives aux fossés diamant de la série G2. Nb : Nombre ; P^{rel} : Part rapportée à la surface totale ; S : Surface totale ; S^{max} : Surface maximale ; S^{min} : Surface minimale ; S^{moy} : Surface moyenne.

vi) Bonnettes

La défense rapprochée repose également sur des dispositifs secondaires aménagés à l'intérieur de l'enceinte, au premier rang desquels figurent les bonnettes. Celles-ci correspondent à des replats taillés dans le talus extérieur afin d'accueillir de l'infanterie en surplomb du fossé. Leur emprise cumulée dépasse 3 000 m² à l'échelle de la ceinture fortifiée de Reims, avec 593 m² au réduit de Chenay, 749 m² au fort de Montbré et 1 678 m² au fort de Saint-Thierry (fig. 5.48A-F). La pente des bonnettes est généralement de l'ordre

de 12°, ce qui les distingue nettement des talus extérieurs avoisinant les 30° (tab. 5.13, 5.20). Leur géométrie triangulaire résulte de leur implantation sur les saillants, qui permet de couvrir les zones mortes engendrées par la différence de tracé entre la crête d'artillerie et l'enceinte de défense (*cf.* partie 5.2.1.2).

Nom	Code	Nb.	S (m²)	S^{min} (m²)	S^{max} (m²)	S^{moy} (m²)	P^{rel}	$Pente^{moy}$
Réduit de Chenay	a	4	515	38	160	99	2	12,4°
Fort de Saint-Thierry	b	3	1 678	452	671	559	3	11,3°
Fort de Brimont	d	0	/	/	/	/	/	/
Fort de Nogent-l'Abbesse	j	0	/	/	/	/	/	/
Fort de la Pompelle	k	0	/	/	/	/	/	/
Fort de Montbré	l	3	749	23	631	250	1,6	12°
Total / Moyenne		10	981	195	485	313	2,6	11,9°

Tableau 5.20 : Statistiques relatives aux bonnettes de la série G2. Moy : Moyenne ; Nb : Nombre ; P^{rel} : Part rapportée à la surface totale ; S : Surface totale ; S^{max} : Surface maximale ; S^{min} : Surface minimale ; S^{moy} : Surface moyenne.

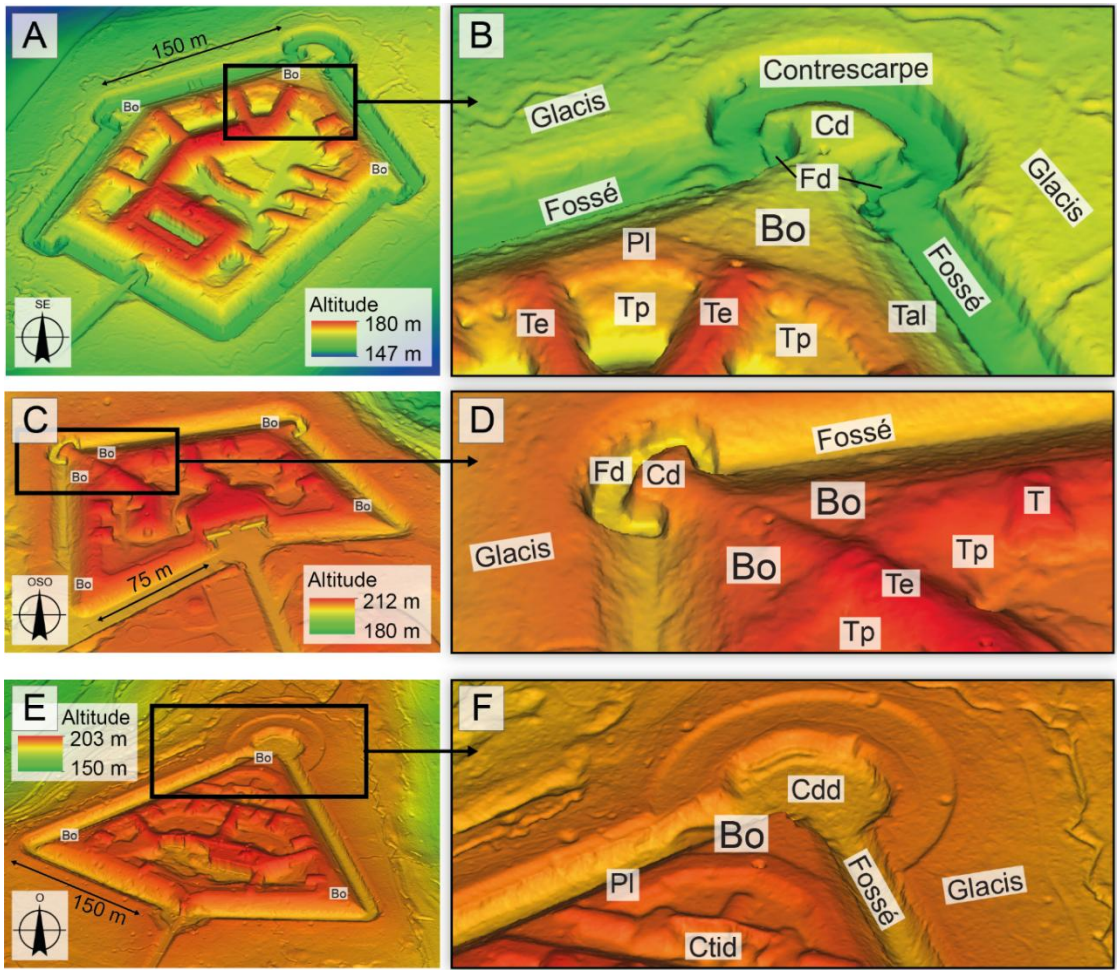


Figure 5.48 : Bonnettes du front de tête (vue topographique en perspective ; données LIDAR HD IGN (2023). A-B : Fort de Montbré ; C-D : Réduit de Chenay ; E-F : Fort de Saint-Thierry. Bo : Bonnette ; Cd : Caponnière double ; Cdd. Caponnière double démantelée ; Ctid. Casemate à tir indirect démantelée ; Fd : Fossé diamant ; Pl : Plongée ; Tal : Talus extérieur ; T : Traverse-abri ; Te : Traverse enracinée ; Tp : Terre-plein.

vii) Ravelins

En dehors de l'enceinte, certains forts conservent des ravelins (ou demi-lunes), correspondant à des organes d'entrée hérités des fortifications bastionnées. Bien que relevant de modèles antérieurs, ils ont été maintenus dans le système Séré de Rivières à l'avant des portes d'accès, le plus souvent en combinaison avec un corps de garde défensif. Morphologiquement, les ravelins prennent la forme de terre-pleins surélevés protégés par un parapet, de géométrie subtriangulaire ou subtrapézoïdale, de manière à former un redan ou un angle saillant autour de la voie d'accès principale. Leur maintien au-delà de 1874 traduit la persistance d'une logique pseudo-bastionnée sur les faces de gorge, notamment en lien avec l'usage résiduel de courtines (fig. 2.18A, 5.8A, J, K). Quatre forts de la ceinture rémoise en possèdent encore, pour une surface totale d'environ 2 200 m². Les ouvrages de Brimont et de Saint-Thierry dépassent chacun 750 m² (fig. 5.49A-B), tandis que ceux de Montbré et de Nogent-l'Abbesse couvrent moins de 400 m² (fig. 5.49C-D).

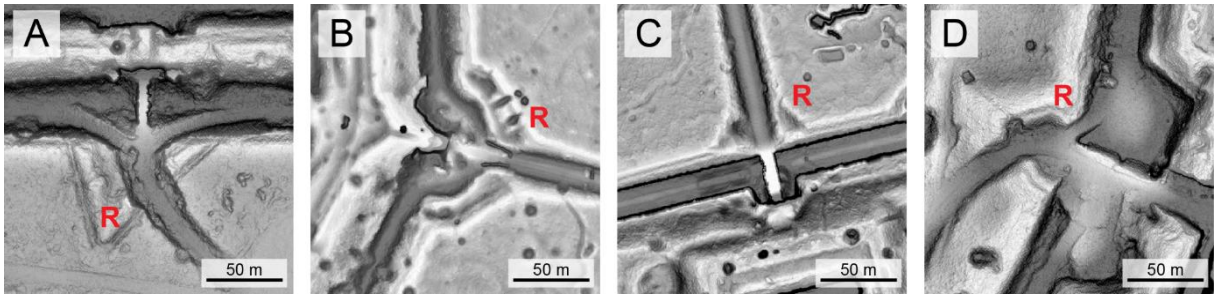


Figure 5.49 : MNT LIDAR HD (IGN) des ravelins (R) des forts de la ceinture de Reims (2023). A : Fort de Brimont ; B : Fort de Saint-Thierry ; C : Fort de Montbré ; D : Fort de Nogent-l'Abbesse.

viii) Ponts et corps d'entrée

À l'arrière des ravelins, quatre accès ont été cartographiés sous la forme de ponts d'une superficie de quelques dizaines de mètres carrés chacun (fig. 5.50). Ils correspondent aux vestiges, plus ou moins remaniés, des ponts mobiles qui commandaient initialement l'entrée des forts. Dans certains cas, ces ouvrages donnent accès à des corps d'entrée disposés sous le rempart, dont la forme, irrégulière et partiellement arasée, reste difficile à caractériser au LiDAR. C'est notamment le cas aux forts de Brimont, de Montbré et de Saint-Thierry, où seules des traces morphologiques fragmentaires subsistent. Pour d'autres forts, à l'inverse, l'entrée se fait directement au droit du casernement situé sous le massif de terre central, tel qu'observé au réduit de Chenay.



Figure 5.50 : Pont d'accès du fort de Montbré (cl : Alain Devos).

ix) Massif de terre

Les massifs de terre correspondent aux volumes de géomatériaux meubles participant à l'hybridation des forts avec la topographie, employés pour mettre les substructures à l'épreuve dans les forts de type 1874 ou seulement pour agir comme pare-éclat, à l'image de certains traverses pleines (fig. 5.51A-C).

Pour cette recherche, une distinction a été établie entre les petits massifs de terre, dont le degré de standardisation est assez élevé pour caractériser la substructure sous-jacente (*e.g.*, traverses-abris, caponnières), des massifs de terre principaux, plus vastes, qui ne retranscrivent pas d'indices morphologiques assez robustes pour reconnaître les types de structure qu'ils recouvrent. Dans un fort, ce type de polémoforme correspond principalement au massif central, surmonté d'une crête d'infanterie caractérisant les forts à batterie basse (fig. 2.16B). Lorsque leur distance est faible avec le sommet du rempart, ces massifs peuvent constituer une masse couvrante servant de parados aux servants d'artillerie et au matériel utilisé sur les terre-pleins et dans les traverses-abris (*e.g.*, fort de Montbré, fig. 5.22F). Leur absence peut engendrer l'emploi d'alternatives, telles que l'utilisation de traverses enracinées (fig. 5.25A-C, 5.33A-B). Ces substructures suivent toutefois une organisation générale déterminant en grande partie la géométrie des massifs, dont les plus conséquentes, et donc les plus influentes, sont le casernement et les magasins à poudre (fig. 5.52A-L).

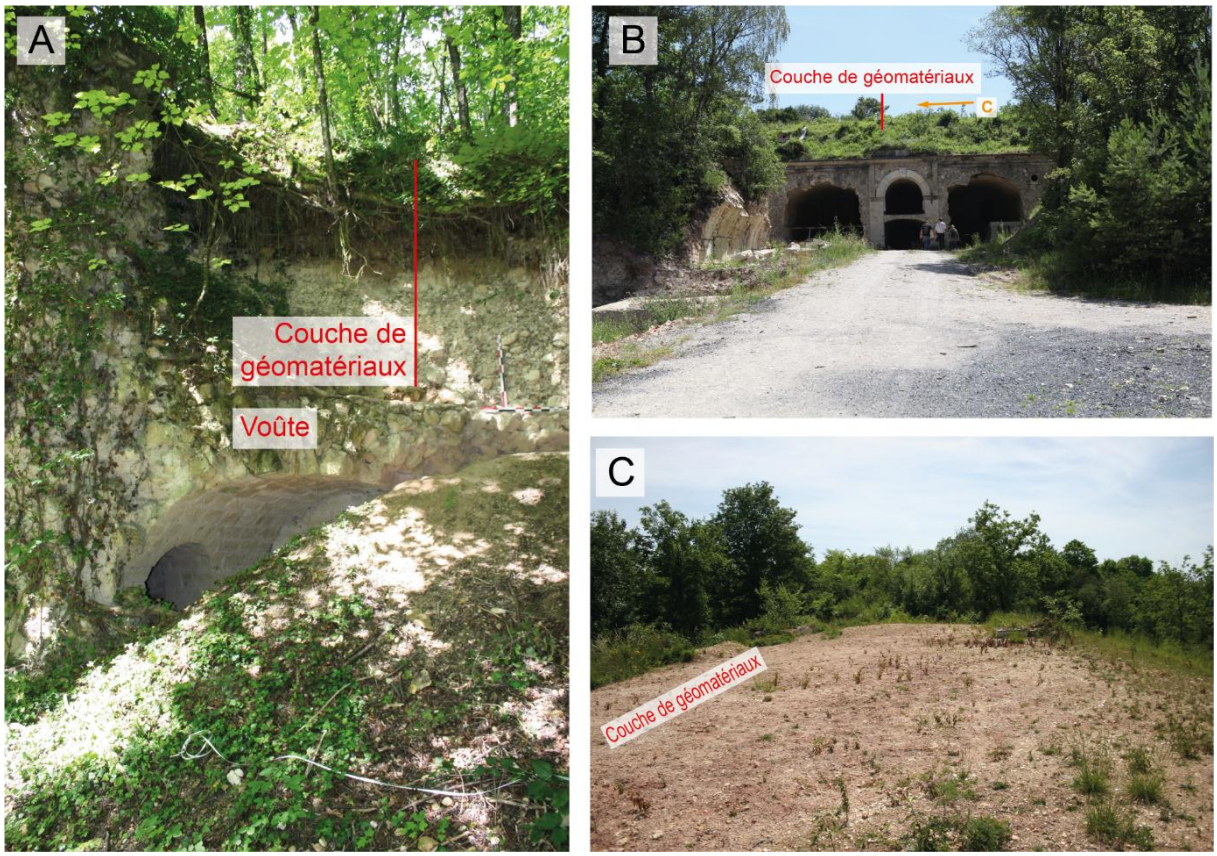


Figure 5.51 : Exemples de massifs centraux des forts de Reims (cl : Alain Devos). A : Fort de Saint-Thierry, à droite de l'entrée, vue depuis le fossé (12 juin 2024) ; B : Fort de Nogent-l'Abbesse, face à l'ancienne entrée et au casernement (été 2018) ; C : Fort de Nogent-l'Abbesse, vue depuis le sommet du casernement (emplacement indiqué sur la vignette B ; 14 juin 2022).

Les magasins à poudre correspondent à une chambre voutée en plein cintre rectangulaire dont la largeur est normalisée, généralement associée à un vestibule d'accès (fig. 5.53A-F). Ils sont pensés de telle sorte à minimiser le risque inhérent à l'entrepôt d'explosifs (humidité, étincelles, sécurité). Le sol est initialement constitué d'un plancher sur lambourdes cloué avec des clous en cuivre, métal non ferreux utilisé par ailleurs car il n'émet pas de particule incandescente en cas de chocs accidentels (gonds, charnières, outils, serrures, *etc.* ; Truttmann, 2017). De même, l'éclairage est assuré à travers des petites ouvertures carrées par des lanternes disposées derrière des vitres épaisses (chambre aux lanternes ; fig. 5.53D). La circulation de l'air est optimisée à la faveur d'un dispositif de ventilation sous plancher, composé de deux petites travées avec voûtes surbaissées localement percées de briques ajourées, dont le fort de Nogent-l'Abbesse en possède l'un des derniers en France (fig. 5.53B, E). Elle est également permise par l'existence d'une double paroi généralement en brique, pouvant être reliée par des boutisses au mur principal (fig. 5.53E-F), ainsi que par une galerie-enveloppe, à laquelle se substitue parfois sur un côté la gaine de circulation principale, comme l'illustre le fort de Brimont (fig. 5.53A-C).

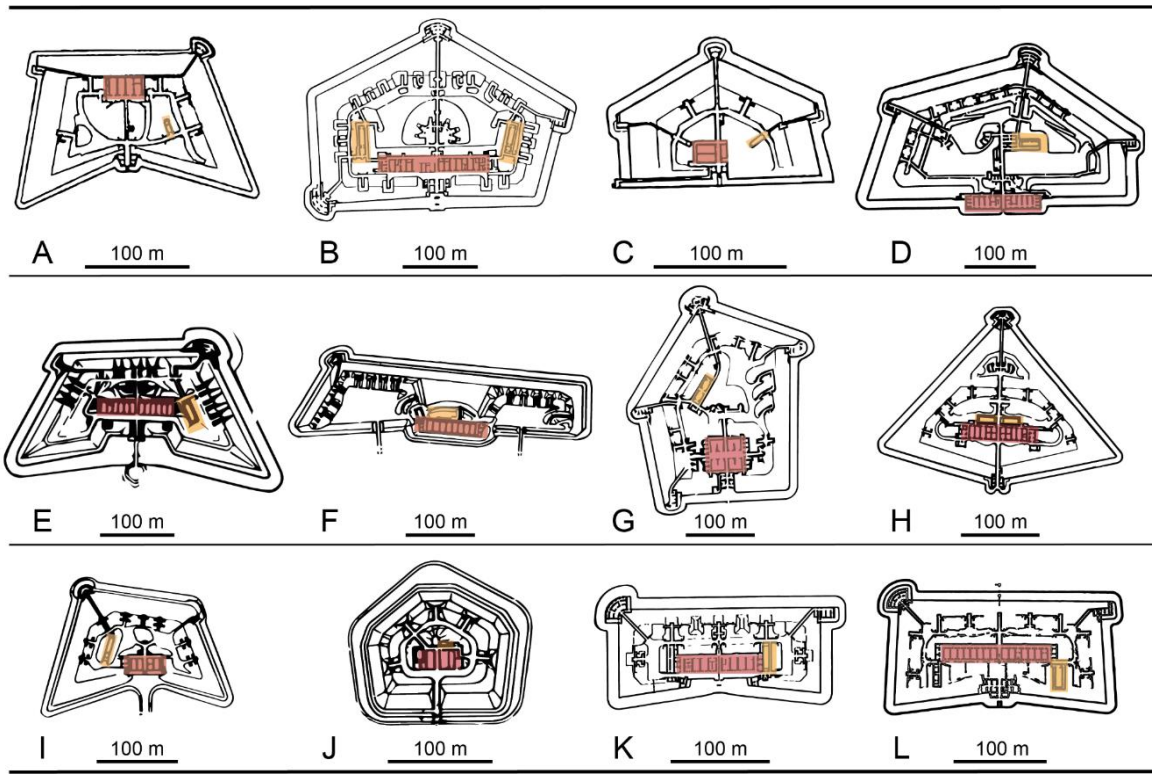


Figure 5.52 : Emplacements schématiques du casernement et des magasins à poudre de chaque fort de la ceinture de Reims. A : Batterie de Loivre ; B : Fort de Brimont ; C : Batterie du Cran de Brimont ; D : Fort de Witry-lès-Reims ; E : Fort de Nogent-l'Abbesse ; F : Batterie de Berru ; G : Fort de Montbré ; H : Fort de Saint-Thierry ; I : Réduit de Chenay ; J : Vigie de Berru ; K : Fort de la Pompelle ; L : Fort de Fresne.

Les casernements correspondent au lieu de vie de toute la garnison, devant donc être disposés à égale distance des différents postes de combat. Ils s'organisent en un alignement de travées voûtées accolées, séparées par des piédroits constituant le module architectural de base répondant aux principes de la casemate de type 1874 (fig. 5.54A-F ; Truttmann, 2017). Toutes les pièces sont reliées à chaque étage par un couloir de fond ponctué de cheminées d'éclairage et d'aération (communément appelés « puits de lumière ») susceptibles d'être bouchés en cas de conflit (fig. 5.55).

La taille de ces deux substructures est globalement proportionnelle à celle du fort qu'elles composent (fig. 5.52A-L). Alors que les magasins à poudre revêtent un haut degré de standardisation inhérent à la gestion du risque d'explosion, plusieurs types de casernement ressortent aujourd'hui selon leur forme et leur position (fig. 5.53A-F) :

- les casernes uniques largement dégagées à l'arrière, typiques des forts de ceinture où le front de gorge ne constitue théoriquement pas une direction dangereuse, généralement placés après un corps d'entrée (forts de Brimont, Nogent-l'Abbesse, Saint-Thierry et la Pompelle ; fig. 5.22B-E) ;

- les casernes uniques de gorge où la façade fait office de front de gorge, comme au réduit de Chenay (fig. 5.22A, 5.54B), ou autrefois, à la batterie de Berru et au fort de Witry-lès-Reims, où la saillie du bâtiment sur le front permettait le flanquement du fossé ;

- le casernement double sur cour fermée du fort de Montbré séparé en quatre corps de bâtiments (fig. 5.22F, 5.54A).

Parmi les casernements des plus petits ouvrages, dont aucun n'est aujourd'hui conservé (vigie de Berru, batteries de Loivre et du Cran de Brimont), la caserne de Loivre possédait la particularité d'être fichée dans le rempart du front de tête en contrebas de la crête d'artillerie (fig. 5.56A-B). Si en temps normal, la position de la crête d'artillerie au sommet de la masse couvrant le casernement est corrélative à l'existence d'un fort à cavalier (fig. 2.16A), l'abaissement progressif de la topographie permettait vraisemblablement de maintenir les batteries d'artillerie dans la configuration basse caractéristique des forts à massif central (fig. 2.16B).

Finalement, trois cas de figure principaux transparaissent dans l'organisation mutuelle des magasins à poudre et des casernements (fig. 5.52A-L), ce qui impacte directement la forme du massif encore visible dans les forts de la série G2 (fig. 5.22A-F ; tab. 5.21) :

- un ou deux magasins à poudre sont juxtaposés plus ou moins perpendiculairement au casernement, ce qui génère un massif multiaxial en forme de U (G2 : forts de Brimont, Nogent-l'Abbesse, la Pompelle ; G1 : fort de Fresne) ;

- un ou deux magasins à poudre sont isolés, ce qui implique un massif de terre détaché au réduit de Chenay (éclaté et compacte) mais pas au fort de Montbré (étiré et orthogonal), où la communication entre les deux organes est également à l'épreuve sous le massif (détachement hypothétique pour les forts du groupe G1 : batteries de Loivre et du Cran de Brimont, fort de Witry-lès-Reims) ;

- un ou deux magasins à poudre sont juxtaposés parallèlement en avant du casernement, ce qui implique un massif protecteur unique de forme uniaxiale simple (G2 : fort de Saint-Thierry ; G1 : batterie et vigie de Berru).

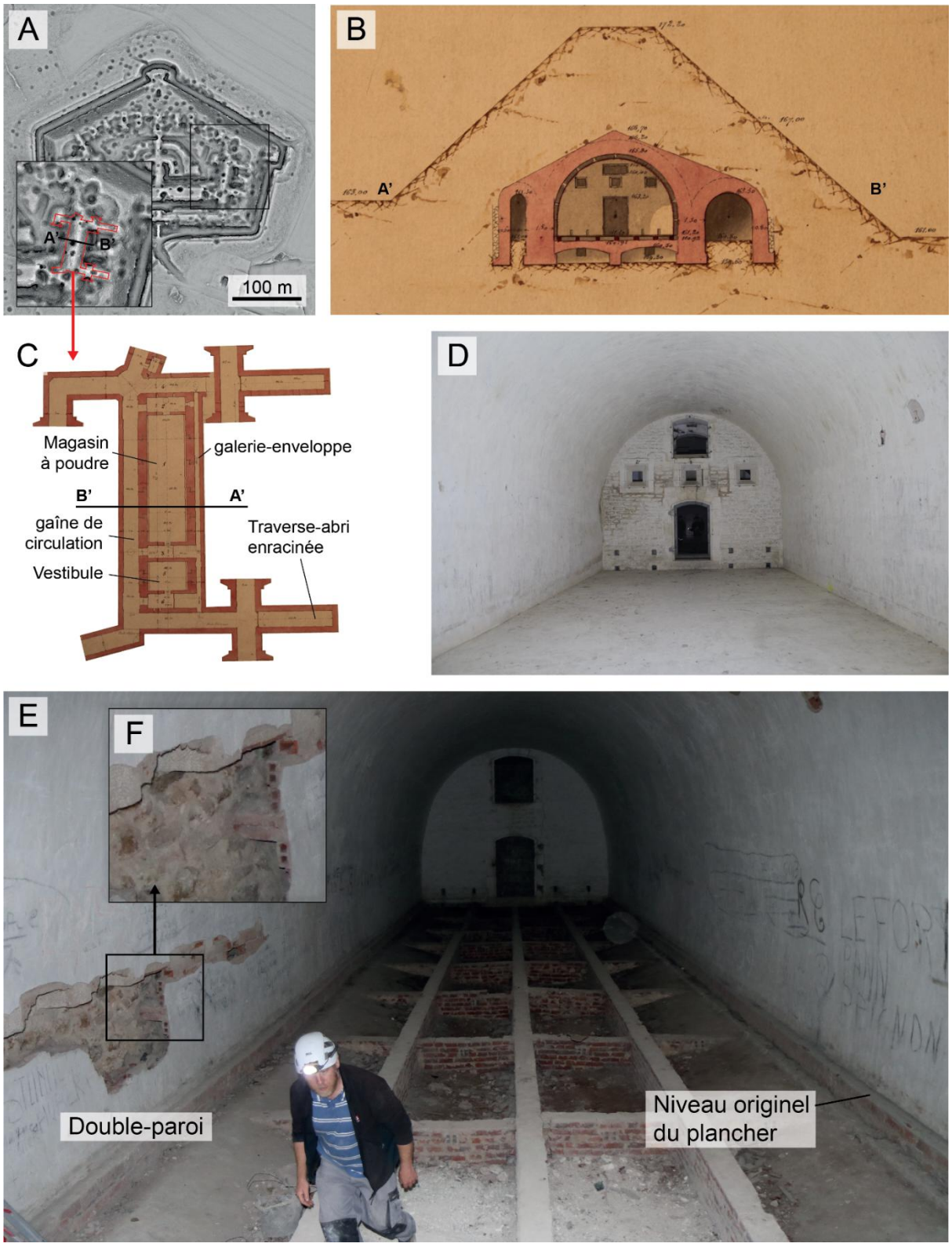


Figure 5.53 : Exemples de magasins à poudre des forts de Reims. A : MNT LIDAR HD 2023 (IGN) du fort de Brimont traité visuellement (LRM + pente en transparence) ; B : Coupe en aquarelle d'un magasin à poudre du fort de Brimont (1880 ; SHD, GR 4 V T 346 1) ; C : Plan en aquarelle d'un magasin à poudre du fort de Brimont (1880 ; SHD, GR 4 V T 346 1) ; D : L'un des deux magasins à poudre du fort de Montbré, vue face au vestibule (cl : Alain Devos) ; E : Magasin à poudre du fort de Nogent-l'Abbesse avec l'un des rares systèmes de ventilation sous plancher préservé en France ; F : Agrandissement sur la double paroi en brique maintenu par des boutisses.

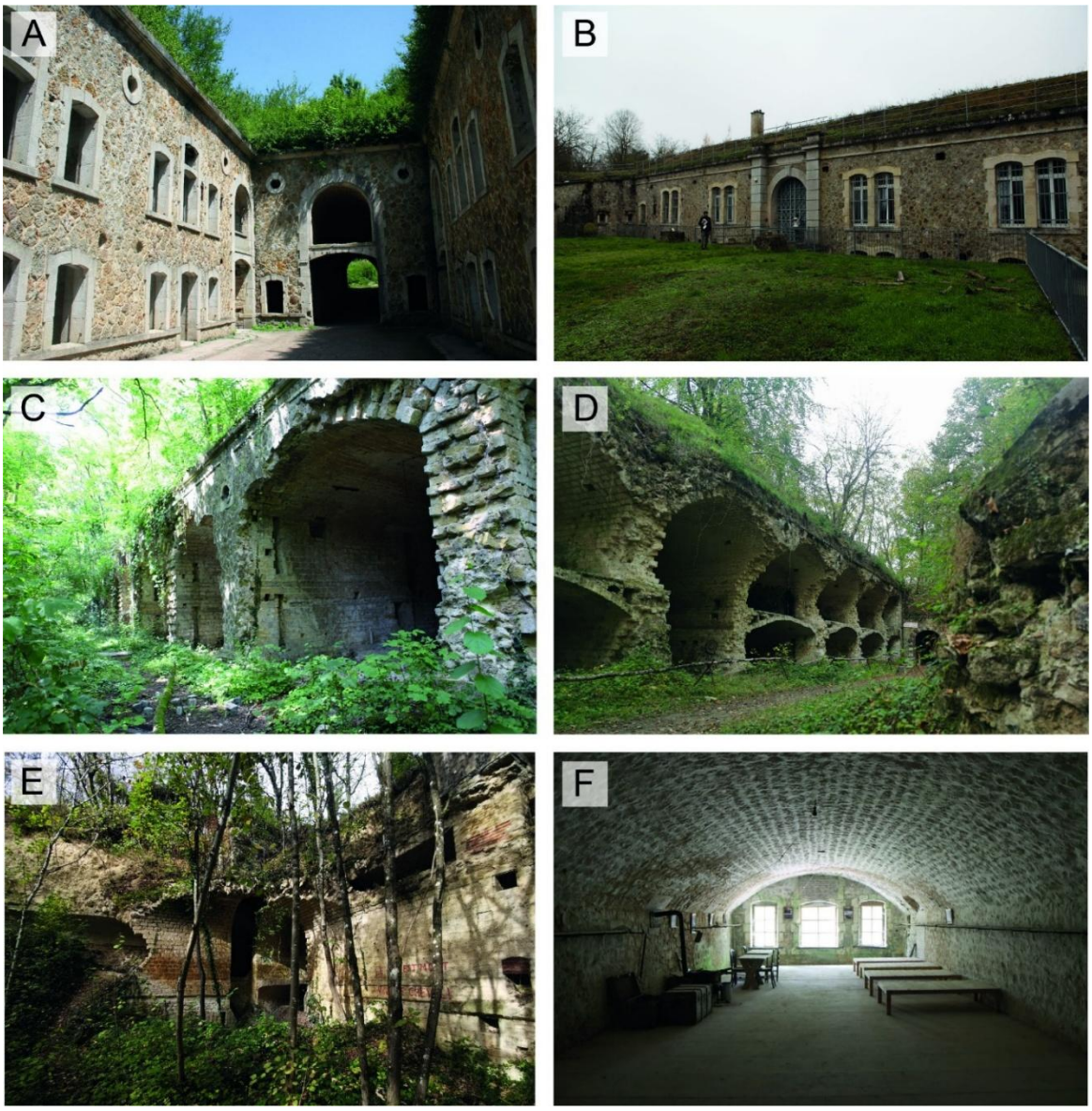


Figure 5.54 : Exemples de casernements dans les forts de la ceinture de Reims. A : Casernes sur cour fermée sur fort de Montbré ; B : Caserne de gorge du réduit de Chenay ; C : Caserne unique centrale du fort de Brimont, à la façade et aux planchers démantelés ; D : Caserne unique centrale du fort de Saint-Thierry, à la façade démantelée (partie nord) ; E : Emplacement de la partie sud du casernement du fort de Saint-Thierry structurellement démantelé ; F : Chambre à l'étage du fort de Nogent-l'Abbesse.

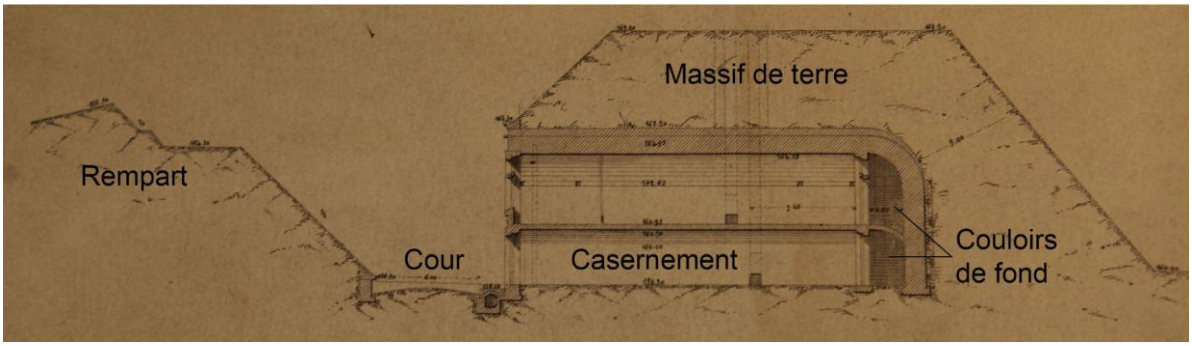


Figure 5.55 : Coupe transversale en aquarelle du casernement du fort de Brimont (1880 ; SHD, GR 4 V T 346 1).

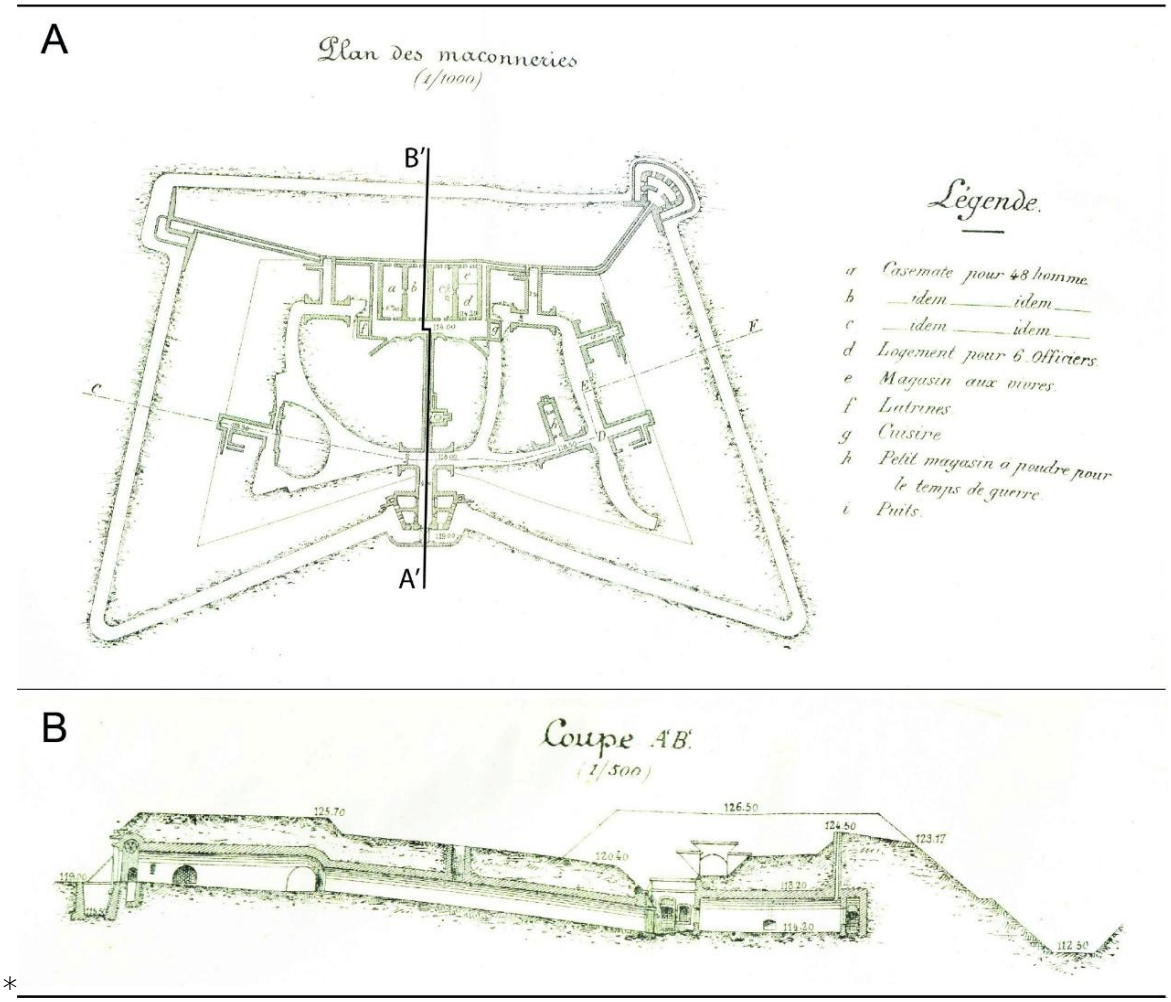


Figure 5.56 : Croquis d'exécution de la batterie de Loivre de 1877 (SHD, GR 2 V 105). A : Plan des maçonneries ; B : Coupe associée.

Nom	Code	Groupe	Type casern.	Nb. mag.	Situation	Forme du massif
Réduit de Chenay	a	G2	Unique de gorge	1	Perpendiculaire	Éclatée et compacte
Fort de Saint-Thierry	b	G2	Unique central	2	Parallèle	Uniaxiale simple
Batterie de Loivre	c	G1	Unique central	1	Détaché	ND
Fort de Brimont	d	G2	Unique central	2	Perpendiculaire	Multiaxiale (en U)
Batterie du Cran	e	G1	Unique central	1	Détaché	ND
Fort de Fresne	f	G1	Unique central	1	Perpendiculaire	Multiaxiale (en U) ?
Fort de Witry-lès-Reims	g	G1	Unique de gorge	1	Détaché	ND
Batterie de Berru	h	G1	Unique de gorge	1	Parallèle	Uniaxiale simple
Vigie de Berru	i	G1	Unique central	1	Parallèle	Multiaxiale (en U)
Fort de Nogent-l'Abbesse	j	G2	Unique central	1	Perpendiculaire	Multiaxiale (en U)
Fort de la Pompelle	k	G2	Unique central	1	Perpendiculaire	Multiaxiale (en U)
Fort de Montbré	l	G2	Multiple sur cour fermée	2	Détaché	Étirée et orthogonale

Tableau 5.21 : Forme du massif selon la position et le type de casernement et de magasin à poudre.

Afin de circonscrire le propos à la thématique géomorphologique, l'ensemble des autres substructures situées dans le massif central ne sont pas détaillées. Les ouvrages de Truttmann (2017) et de Coutant et al. (2017) fournissent, respectivement à l'échelle du système Séré de Rivières et de la ceinture de Reims, des informations architecturales et fonctionnelles plus précises.

Dans une moindre mesure, certains forts comprennent également des massifs de terre secondaires, souvent disposés en contrebas du massif central dans le but de protéger des casemates à tir indirect (ou caves à canon). Cette configuration est valable pour le fort de Nogent-l'Abbesse et surtout pour les forts de Montbré et Brimont (annexe 48A-B), où elles sont encore conservées. Elles s'y organisent respectivement perpendiculairement et de façon rayonnante à l'axe central du fort, permettant dans ce dernier cas de balayer un champ de tir de 200-220°, protégé des tirs de contre batterie par un second massif pare-éclat (fig. 5.57A-C). Enfin, si les casemates à tir indirect principales du fort de Saint-Thierry, situées entre la crête d'artillerie et la bonnette de tête, ont aujourd'hui été démantelées, l'une des deux existant initialement au sommet du massif central, également cartographiée comme massif secondaire, existe toujours (fig. 5.22B).

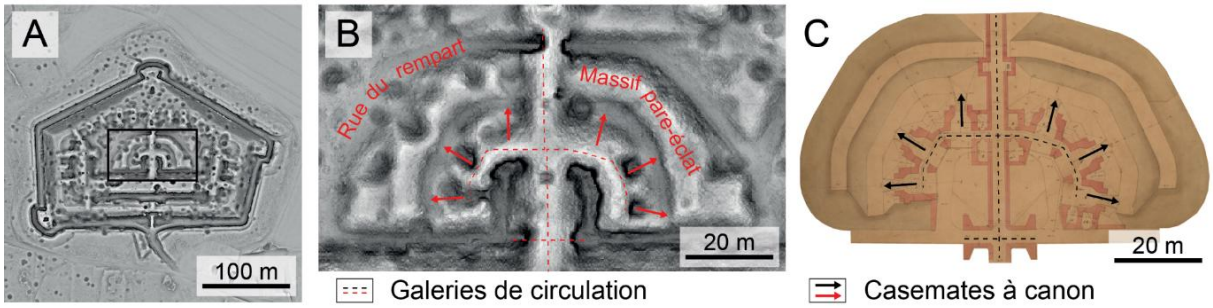


Figure 5.57 : Casemates à tir indirect du fort de Brimont. A : MNT LIDAR HD IGN (2023) traité visuellement ; B : Agrandissement de la vignette A au droit des casemates ; C : Croquis planimétrique aquarelle associé (1880 ; SHD, GR 4 V T 346 1).

x) Cas particuliers

Deux catégories de formes inventoriées sont ici présentées en tant que cas particuliers : les magasins-cavernes et les aménagements postérieurs.

La ceinture de Reims comporte deux magasins-cavernes du même type, construits en 1891-1892 dans le secteur du Mont de Berru, en arrière du fort de Nogent-l'Abbesse et de la vigie de Berru (fig. 5.58A-C). Leur vocation est de délocaliser les munitions et explosifs en créant des sites de stockage souterrain, au sein du sous-sol géologique, afin d'augmenter la protection contre les coups d'artillerie ennemis (fig. 5.58C). Les abris, constitués de salles voûtées de plein cintre, sont structurés autour de deux tunnels d'accès parallèles qui aboutissent à une galerie transversale. Ils desservent respectivement huit et sept salles, dont seules une à deux sont dévolues à l'hébergement des munitions et de la poudre (Ministère de la Guerre, 1893 ; Frinjs et al., 2008). En surface, les indices morphologiques visibles au LiDAR correspondent aux plateformes d'accès de 1 200 et 1 400 m², terrassées pour l'occasion, ainsi qu'aux deux entrées du souterrain qui créent une petite échancrure dans le talus (fig. 5.58A-B). L'analyse de plans détaillés du Génie a permis d'estimer un volume excavé de l'ordre de 1 000 m³ par structure.

Enfin, une surface d'environ 13 500 m² d'aménagements a été digitalisée dans l'emprise des fortifications de Reims, lorsque le remaniement postérieur à leur période de construction et de fonctionnement est apparu évident, ou que la lecture morphologique des polémoformes initialement présentes était impossible. L'origine de ces aménagements ou démantèlement peut être militaire ou civile et dater d'époques allant de la Première Guerre mondiale à aujourd'hui (*cf.* partie 6.1.3).

Si ces surfaces anthropisées restent mineures, atteignant 10 % de la surface totale maximum des forts du groupe G2, elles constituent en revanche, une caractéristique majeure des forts du groupe G1, actuellement les moins lisibles morphologiquement, qui sont abordés dans la section suivante.

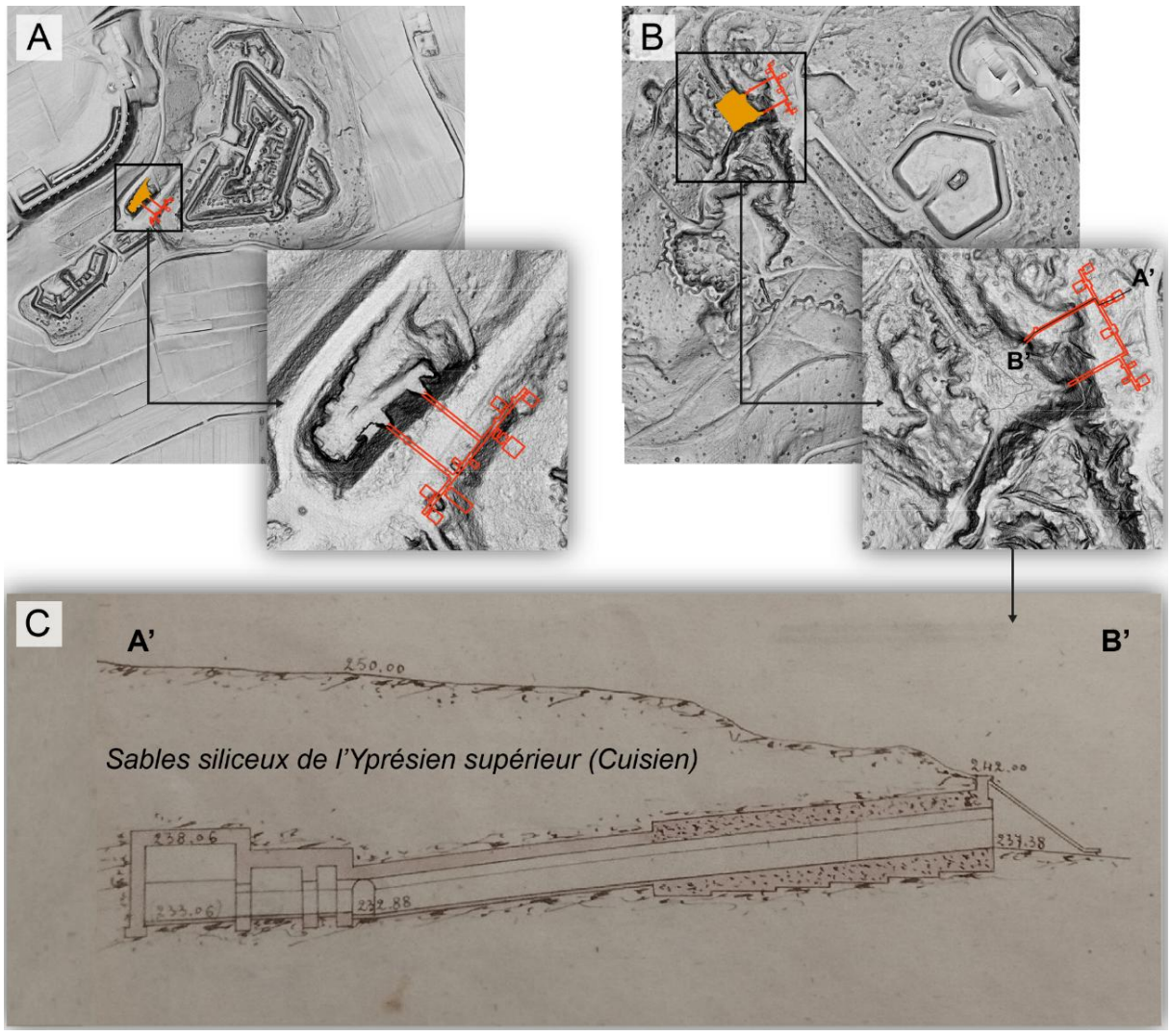


Figure 5.58 : Magasins sous roc (ou magasins-cavernes) de la ceinture de Reims. A : MNT LIDAR HD (2023, IGN) du fort de Nogent-l'Abbesse traité visuellement (pente + LRM en transparence) ; B : MNT LIDAR HD (2023, IGN) de la vigie de Berru traité visuellement (comme vignette A) ; C : Coupe en aquarelle du magasin à poudre souterrain de la vigie de Berru (1902 ; SHD, GR 9 NN 4 287 3).

5.2.3.2. Morphologies les moins lisibles

Les forts du groupe G1 se caractérisent par un nombre de formes effacées et de substructures majoritairement démantelées ou invisibilisées par des actions anthropiques postérieures à la Première Guerre mondiale (fig. 5.59A-F ; *cf.* partie 6.1.3).

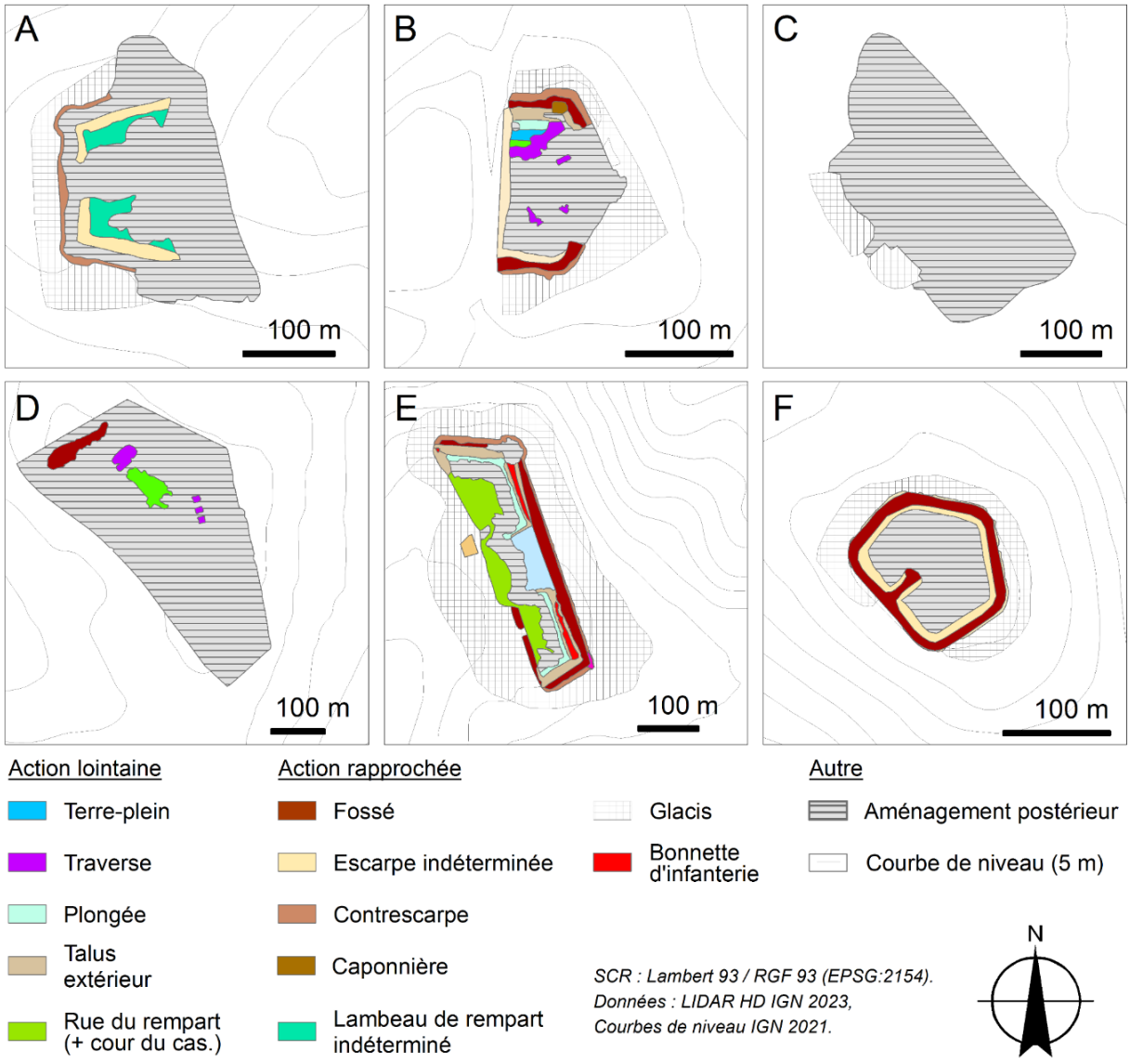


Figure 5.59 : Inventaire des morphologies internes aux forts Séré de Rivières de la ceinture de Reims les moins lisibles (groupe G1). A : Batterie de Loivre ; B : Batterie du Cran de Brimont ; C : Fort de Fresne ; D : Fort de Witry-lès-Reims ; E : Batterie de Berru ; F : Vigie de Berru.

Ces surfaces bouleversées, atteignant près de 25 ha, impliquent sur certains sites des superficies supérieures à celles des forts initiaux (tab. 5.22). Cela concerne la batterie de Loivre (3,4/2,6 ha) et les forts de Fresne (5,9/3,8 ha) et de Witry-lès-Reims (11,7/7,2 ha), en parallèle desquels les ouvrages de la batterie du Cran de Brimont et la vigie de Berru possèdent la moitié de leur emprise remaniée.

Nom	Code	S^{AM}	S^{TP}	S^{TR}	S^{PL}	S^{TE}	S^{RR}	S^{FF}	S^{CE}	S^{CA}	S^{BO}	S^{GL}	S^{ES}
Batterie de Loivre	c	34 456	/	/	/	/	/	/	/	/	/	11 655	3 458
Batterie du Cran	e	9 467	243	938	264	571	113	1 378	1 068	147	/	9 455	1 478
Fort de Fresne	f	58 514	/	/	/	/	/	/	/	/	/	6 528	/
Fort de Witry -lès-Reims	g	116 866	/	1 783	/	/	3 027	3 317	/	/	/	/	/
Batterie de Berru	h	13 624	/	/	2 947	5 897	9 980	8 027	3 056	/	1 461	78 690	/
Vigie de Berru	i	8 536	/	/	/	/	/	4 185	513	/	/	9 361	2 631
Moyenne		241 463	243	2 721	3 211	6 468	13 120	16 907	4 637	147	1 461	115 689	7 567
Total		40 244	243	1 361	1 606	3 234	4 373	4 227	2 319	147	1 461	23 138	3 784

Tableau 5.22 : Statistiques relatives aux forts de la série G1. AM : Aménagement postérieur ; BO : Bonnette ; CA : Caponnière ; CE : Contrescarpe ; ES : Escarpe ; FF : Fond du fossé ; GL : Glacis ; S : Surface ; PL : Plongée ; RR : Rue du rempart ; TE : Talus extérieur ; TP : Terre-plein ; TR : Traverse.

La batterie de Berru constitue un cas particulier puisque ces surfaces bouleversées, de l'ordre d'un quart de la superficie totale, sont circonscrites à l'emplacement théorique des substructures (caponnière, casernement, traverses-abris), laissant notamment intact les principaux terrassements de l'ouvrage. Pour les traverses-abris, par exemple, l'emprise des bâtiments voûtés, initialement recouverts de terre, apparaît aujourd'hui sous forme de petits fossés flanqués de levées, correspondant au négatif des anciennes maçonneries (fig. 5.60A-D).

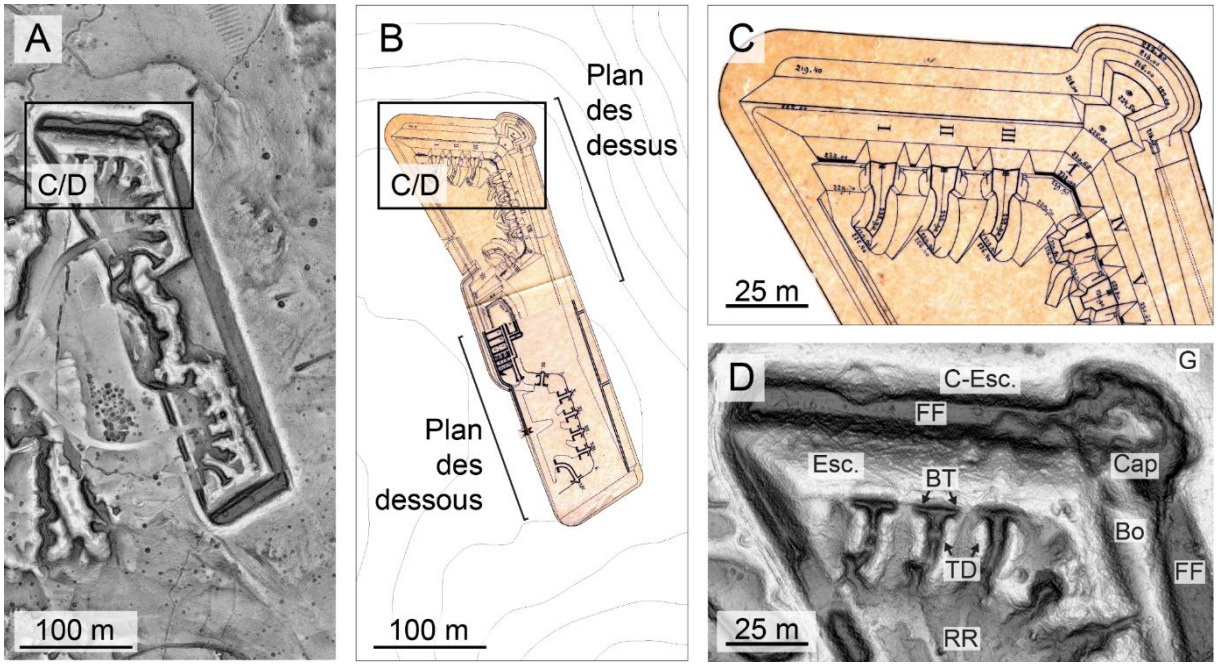


Figure 5.60 : Traverses démantelées de la batterie de Berru. A : MNT LIDAR HD traité visuellement (pente + LRM en transparence) de la batterie de Berru (2023) ; B : Plans des dessus et des dessous correspondant (source : AAFNA) ; C : Agrandissement du plan des dessus sur l'extrémité nord de la batterie (source : AAFNA) ; D : Agrandissement de la vignette A. Bo : Bonnette ; BT : Bras de traverse ; Cap : Reliefs relictuels de la caponnière double démantelée ; C-Esc : Contrescarpe ; Esc : Escarpe ; F : Fond du fossé ; RR : Rue du rempart ; TD : Reliefs relictuels d'une traverse démantelée.

La surface relative du fossé (16 %) et de la plongée (6 %) de cette structure coïncident ainsi avec les valeurs des forts de la série G2. La surface relative du talus extérieur (12 %) est en revanche bien plus basse, probablement du fait de l'existence d'un peu moins de 1 500 m² de bonnettes. Enfin, avec un peu moins de 10 000 m², la rue du rempart est proportionnellement la plus importante par rapport aux autres forts de la ceinture de Reims, représentant pas moins de 20 % de la surface totale de la batterie.

Le secteur de la batterie de Berru comporte par ailleurs la morphologie héritée d'une source Rouby, dont l'appareil de réception mesure 600 m², utilisée pour l'alimentation en eau de la batterie de Berru (fig. 5.61A-C ; annexe 12A-B ; Houdaille, 1889).

Pour les autres ouvrages du groupe G1, les formes associées aux fortifications Séré de Rivières n'impliquent généralement que quelques traces anecdotiques (tab. 5.22 ; fig. 5.59A-F). On peut ainsi différencier les ouvrages de la batterie du Cran de Brimont et du fort de Witry-lès-Reims où il persiste le plus de formes relictuelles (fossé, rue du rempart, traverses-abris, *etc.*), la batterie de Loivre et la vigie de Berru, où subsistent certains grands reliefs initiaux (escarpe indifférenciée, fossé) et enfin le fort de Fresne où aucune morphologie originelle n'a été reconnue dans les données LiDAR. On note toutefois à nouveau la persistance d'une forme relictuelle du rempart et du glacis dans la topographie, même s'il n'est parfois plus possible de les délimiter précisément (*cf.* partie 5.2.2).

En définitive, cette analyse topographique LiDAR montre une standardisation des forts Séré de Rivières de la ceinture de Reims effective à l'échelle de l'organisation interne. Les principales formes, constituant souvent des invariants morphologiques (parapet, terre-pleins, traverses, rampes, rues du rempart, fossés, talus, glacis, caponnières, bonnettes, massifs centraux), occupent des parts relatives comparables d'un ouvrage à l'autre issues de prescriptions doctrinales précises. Dans le même temps, l'inventaire met en évidence une série de particularismes (traverses coudées ou à étages, casemates à tir indirect, escarpes mixtes, caponnières de gorge, magasins-cavernes ou encore source Rouby) qui illustrent la capacité d'adaptation du système aux contraintes de site. L'opposition entre forts les plus lisibles (G2) et forts les plus effacés (G1) souligne enfin le rôle déterminant des remaniements postérieurs dans l'effacement différentiel des formes, tout en montrant que certaines composantes persistent davantage (*e.g.*, glacis, fossés).

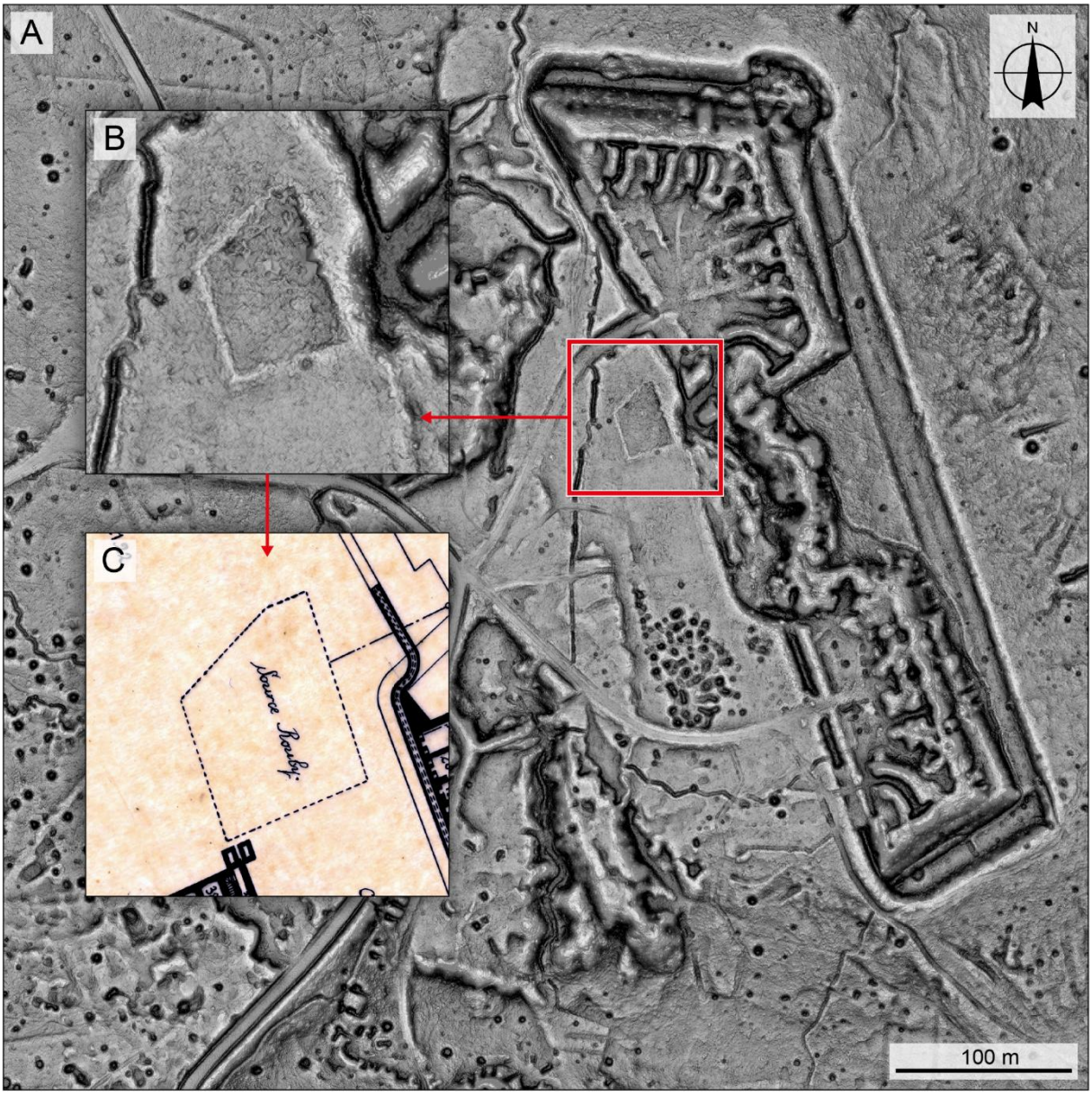


Figure 5.61 : Signature morphologie de la source Rouby de la batterie de Berru (**annexe 12A-B**). A : MNT LIDAR HD (2023, IGN) de la batterie de Berru traité visuellement (LRM + pente en transparence) ; B : Agrandissement de la vignette A au droit de la source Rouby ; C : Extrait d'un plan des structures de Berru (source : Jean-Paul Batteux).

Conclusion de la partie 5.2

Au terme de cette analyse, les fortifications Séré de Rivières de la ceinture de Reims apparaissent comme des méga-polémoformes, couvrant près de 50 ha et représentant près de 1 700 000 m³ de matériaux bouleversés, pour l'essentiel exogènes. Leur géométrie d'ensemble, typiquement pentagonale, organisée autour d'un massif central et associée à des profils de rempart similaires, confirme un haut degré de standardisation à l'échelle globale. À l'échelle interne, l'inventaire LiDAR met en évidence une organisation morpho-fonctionnelle récurrente, structurée par le triptyque intendance-action lointaine-défense rapprochée des forts de type 1874, et fondée sur des composantes caractéristiques (terre-pleins, traverses, rues du rempart, fossés, talus, glacis, caponnières, massifs) dont les parts relatives et les caractéristiques morphométriques sont comparables d'un ouvrage à l'autre.

Cette standardisation n'exclut pas des particularismes marqués. Ils affectent aussi bien la géométrie globale (*e.g.*, fort subtriangulaire de Saint-Thierry, batterie allongée de Berru) que l'agencement interne (*e.g.*, source Rouby, casemates à tir indirect). L'analyse met également en lumière deux groupes contrastés selon leur degré d'effacement topographique avec d'un côté des forts dont il ne subsiste que des lambeaux (G1) et de l'autre des ouvrages encore nettement lisibles (G2).

La partie 5.2 établit ainsi un référentiel morphologique des polémoformes Séré de Rivières de Reims fondé sur leurs caractéristiques géométriques, leur organisation spatiale et leur état de conservation. Ce cadre constitue la base d'interprétation des formes qui s'adossent à ces ouvrages ou composent leur environnement archéologique, analysées dans les sections 5.3 et 5.4, et prépare l'étude morphogénétique développée au chapitre 6.

Ces résultats soulèvent toutefois plusieurs questions centrales : quels facteurs expliquent les variations de morphologie et d'intégrité entre forts, quelles trajectoires ont conduit à leurs états actuels, et quels rôles ont joué la nature et l'extraction des géomatériaux mobilisés ? Ils invitent également à interroger les processus d'effacement ou de conservation à l'œuvre depuis la construction et à évaluer, au-delà du secteur rémois, l'ampleur géomorphologique du système Séré de Rivières.

5.3. Polémoformes de la Première Guerre mondiale

À l'échelle unitaire, les polémoformes de la Première Guerre mondiale présentent des morphologies plus simples que celles des forts Séré de Rivières, mais leur organisation spatiale est beaucoup plus diffuse et complexe (Taborelli et al., 2017b ; De Matos-Machado, 2018). Déployées sur l'ensemble du front occidental (environ 750 km), les réseaux de défense atteignent ainsi localement plusieurs dizaines de kilomètres de largeur, comme dans le secteur rémois (Taborelli, 2018).

L'analyse porte ici sur les vestiges de la Grande Guerre du secteur de Reims révélés par le LiDAR, présentés par type d'entité cartographique (polylignes, 5.3.1 ; points, 5.3.2). Chaque type de polémoforme est étudié selon une approche typologique multicritères inspirée de Taborelli et al. (2017b), recentrée sur le secteur d'étude. L'accent est mis sur les caractéristiques morphologiques et morphométriques, usage, fonction et âge n'étant pris en compte qu'à titre secondaire. Cette partie vise par ailleurs à décrire la distribution actuelle de ces morphologies héritées de la guerre, sans prétendre reconstituer intégralement les systèmes militaires (5.3.3). Documenter leurs caractéristiques et leur inscription dans le relief doit ensuite permettre de les confronter, en discussion, aux plans directeurs et aux sources historiques afin de questionner la relation morphologique et spatiale mutuelle qu'elles entretiennent avec les forts Séré de Rivières.

5.3.1. Polémoformes linéaires

L'inventaire cartographique débute par les morphologies cartographiées par l'intermédiaire de polylignes, représentant près de 100 km. Près de 85 % du linéaire correspond à des tranchées et des boyaux, formes emblématiques de la Première Guerre mondiale et marqueur de la stabilisation du front durant quatre années (guerre de position), complétées par des voies ferrées et des épaulements indifférenciés d'origine militaire.

5.3.1.1. Tranchées et boyaux

Les tranchées et boyaux sont des fossés artificiels creusés à des fins de fortification provisoire. Ils sont de profondeur métrique à plurimétrique, composés d'aménagements détaillés tels que les bermes, les banquettes de tir, ou les réservoirs (fig. 5.62A-B) et munis de protection latérales (parapet et parados). Les terminologies morphologiques « tranchées » et « boyaux », relatives à des formes concaves, désignent ainsi également par métonymie ces formes en élévation induisant des perturbations plus larges que le seul linéaire de fossés. La trace atténuée révélée par les données microtopographiques correspond donc aujourd'hui à un fossé de profondeur pluridécimétrique accompagné de faibles levées de terre (fig. 4.38, 5.63A-B).

L'inventaire a permis de digitaliser près de 84 km de tranchées sur l'ensemble des secteurs d'étude dont la moitié se situe sur la butte de Berru et un quart sur le Massif de Saint-Thierry, le solde se répartissant entre la butte de Brimont (22 %) et les trois sous-secteurs de 1 km² (forts de Fresne, la Pompelle et Montbré ; tab. 5.23). Rapporté à la surface de chaque secteur, le linéaire total traduit de forts contrastes de densité, particulièrement en milieu forestier, variant logiquement avec la position de défense : la butte de Brimont atteint une densité théorique d'environ 12 400 m/km² (2e puis 1re position à partir du printemps 1917), les trois sous-secteurs près de 8 500 m/km² (la Pompelle en 1re position), contre 6 900 et 4 400 m/km² pour la butte de Berru et le Massif de Saint Thierry (2e et 3e positions).

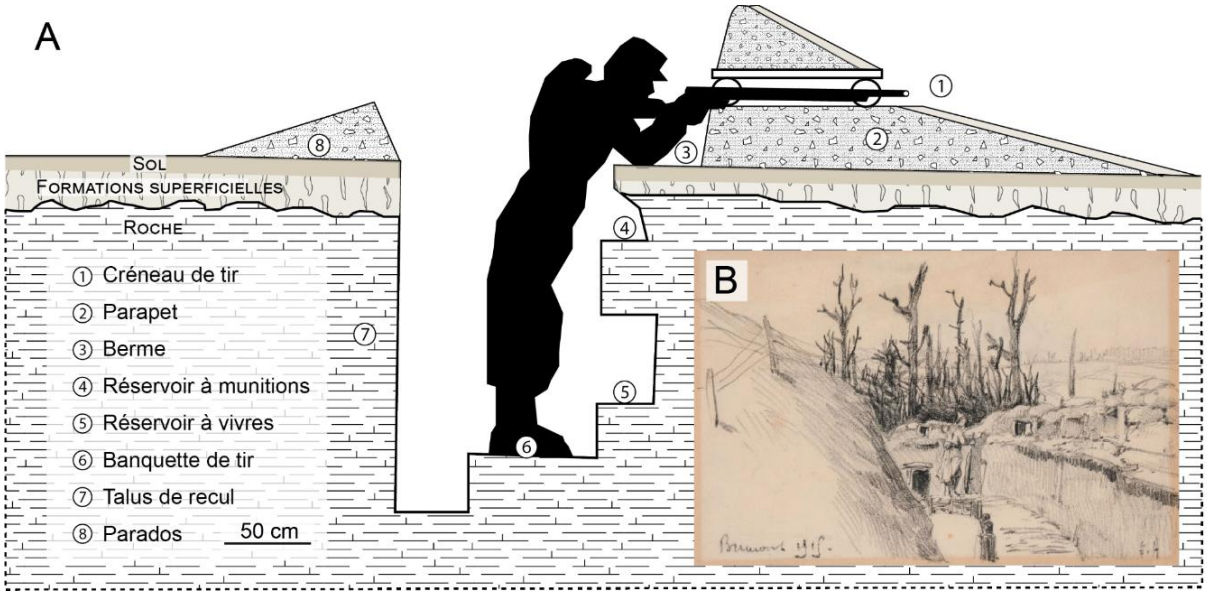


Figure 5.62 : Profil et croquis de tranchée en 1915 (d'après Taborelli, 2018). A : Profil réglementaire en terrain ordinaire ; B : Soldat dans une tranchée à Brimont (dessin : Émile Appay ; cl : Christian Devleeschauwer ; Musée des beaux-arts de Reims).



Figure 5.63 : Exemple de tranchées sur la butte de Brimont (cl : Alain Devos). A : Tranchée à traverses en U ; B : Boyau au tracé sinueux irrégulier.

	Tranchée *linéaire (m)*	*densité surfacique [m / km²] (sous forêt)*	Voie étroite *linéaire (m)*	Épaulement d'origine militaire *linéaire (m)*	Total *lin. (m)*
MdBr	18 646	3 729 (12 431)	/	/	18 646
MdBe	42 541	2 239 (6 861)	3 596	9 107	55 244
MdST	21 144	2 643 (4 405)	/	/	21 144
Autres	1 951	650 (8 483)	/	/	1 951
Total	84 282	2 315 (8 045)	3 596	9 107	96 985

Tableau 5.23 : Statistiques relatives aux polémoformes de la Première Guerre mondiale cartographiées en polylignes. MdBe : Mont de Berru ; MdBr : Mont de Brimont ; MdST : Massif de Saint-Thierry. Autres : Secteurs des forts de Fresne, la Pompelle et Montbré.

La différence de fonction entre les tranchées et les boyaux (tranchées de communication), distinction établie par le Génie militaire français dès le XIXe siècle, impacte directement leur morphologie (fig. 5.64) :

- Les tranchées d'attaque, généralement parallèles à la ligne de front, présentent des tracés fortement sinueux destinés à réduire les effets du tir d'enfilade et du souffle des obus, presque exclusivement sous forme de traverses en U (traverses tournantes exceptionnelles ; fig. 5.63A).

- Les boyaux, tracés perpendiculairement au front pour assurer la connexion entre les lignes, revêtent une sinuosité plus faible qualifiée d'irrégulière (fig. 5.63B), et dans une moindre mesure, de régulière ou en zigzag.

De même que la densité de formes, l'orientation des tranchées varie d'un secteur à l'autre en fonction de leur insertion dans les réseaux de défense (fig. 5.65). Dans le Massif de Saint-Thierry, toutes les classes sont représentées par au moins 1 000 m de linéaire, avec une direction dominante de 140-150° (2 000 m) et deux pics secondaires à 0-10° et 70-80° (près de 1 500 m chacun). Sur les buttes-témoins, la répartition est plus contrastée. La butte de Berru montre une surreprésentation de l'intervalle 0-20° et une sous-représentation de 50-70°, tandis que la butte de Brimont présente un maximum entre 70 et 110° et un second pic autour de 40-50°, les deux buttes dépassant toutes deux 1 400 m de linéaire.

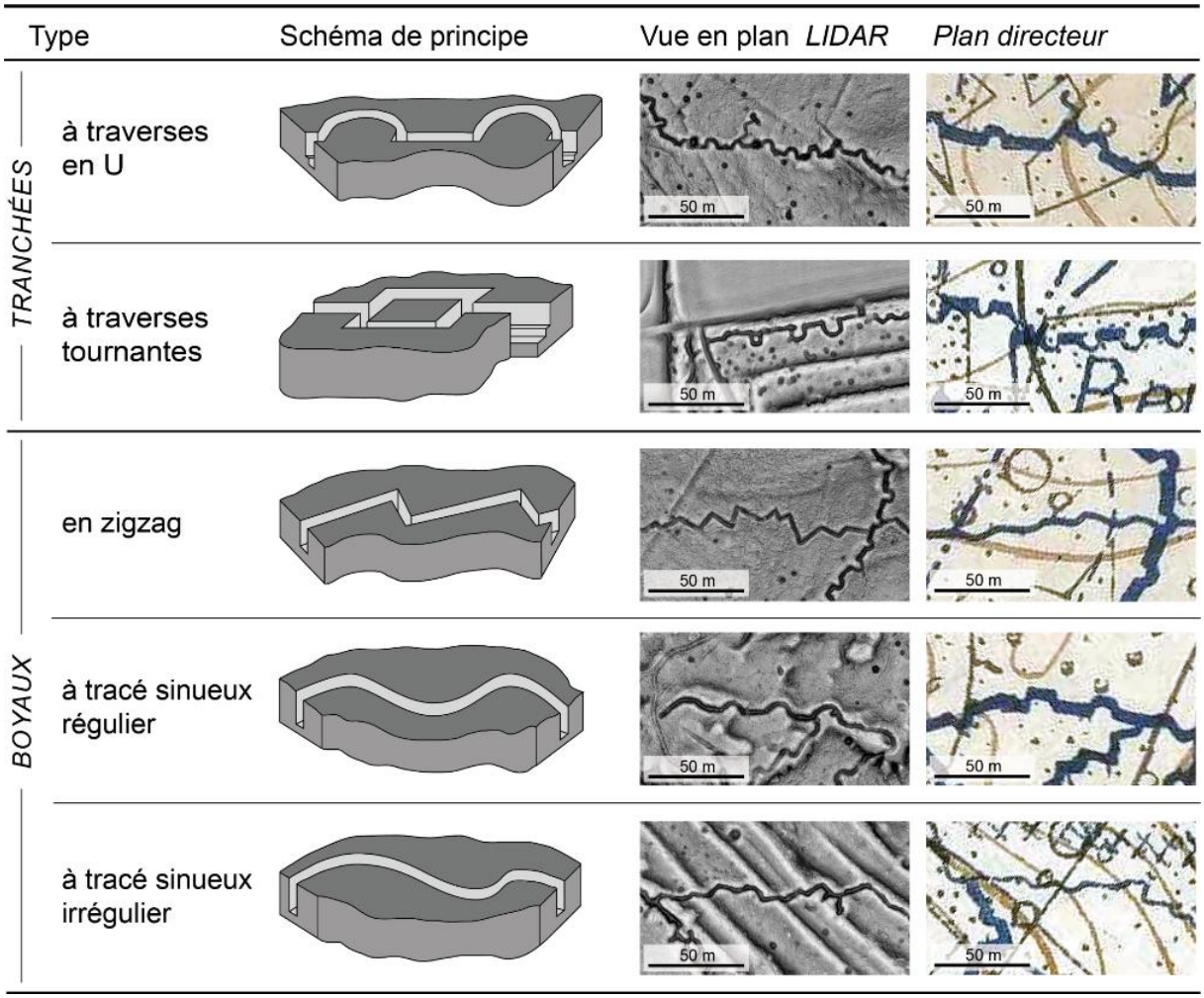


Figure 5.64 : Typologie des tranchées et boyaux inventoriés à partir des données LiDAR (d'après Taborelli et al., 2017b).

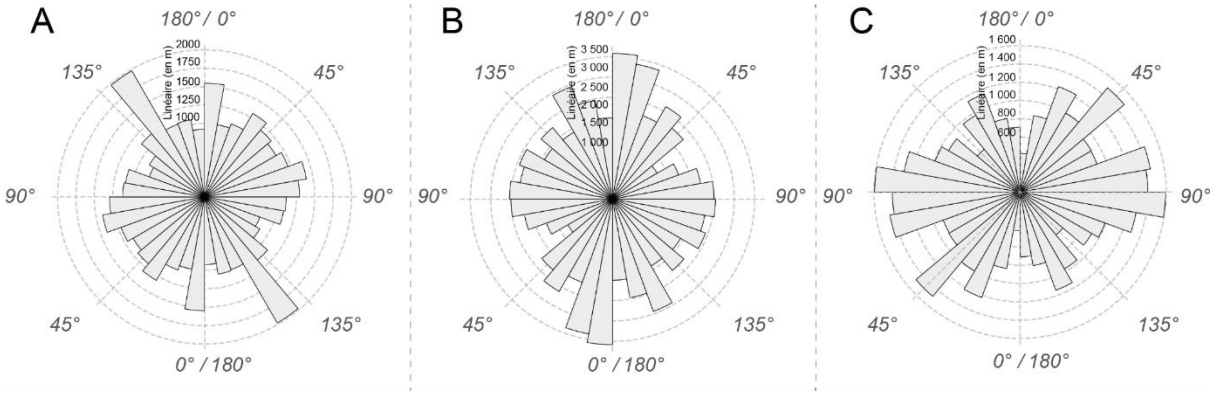


Figure 5.65 : Diagrammes de distribution des orientations moyennes des tranchées et boyaux (0-180°, classes de 10°, pondéré par la longueur, symétrisé 0-360°). A : Massif de Saint-Thierry ; B : Butte de Berru ; C : Butte de Brimont.

Dans de très rares cas, les plans directeurs suggèrent que certains fossés, visuellement assimilables à des tranchées militaires, correspondent en réalité à des creusements

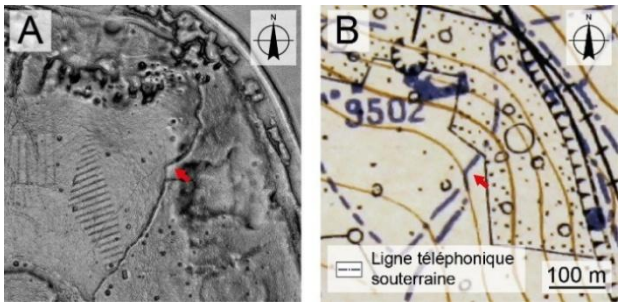


Figure 5.66 : Exemple de tranchée représentée en tant que ligne téléphonique souterraine sur le plan directeur des GCTA. A : MNT LIDAR HD (2023) traité visuellement (pente + LRM en transparence) ; Extrait du plan directeur de Beine au 1/ 10 000 du 16 septembre 1918 (SHD, GR 6M LVIB1B 41 - 3).

techniques liés à des lignes téléphoniques souterraines, comme observé dans le secteur de la batterie de Berru (fig. 5.66A-B).

La comparaison entre le linéaire de tranchées détecté au LiDAR et celui figurant sur les plans directeurs des GCTA permet d'estimer le taux d'effacement de ces polémoformes (De Matos-Machado, 2018 ; *cf.* partie 4.3.3.4). D'après la BD Tranchées (Taborelli, 2018), le réseau atteindrait plus de 236 km, dont 91 km situés aujourd'hui sous couvert forestier (linéaire théorique ; tab. 5.24). Sur cet ensemble, 84 km de fossés atténués subsistent encore, presque exclusivement en forêt, portant le taux de conservation global à 36 % alors qu'il monte à 93 % en restreignant la comparaison aux espaces boisés (tab. 5.24 ; fig. 5.67A-I). À l'échelle des sites d'étude pris indépendamment, ce taux de conservation sous forêt atteint également 36 % sur les trois sous-secteurs d'avant-butte crayeuse, 66 % sur la butte de Brimont et 85 % dans le Massif de Saint-Thierry. Sur la butte de Berru, la longueur de linéaire identifiée au LiDAR excède même la valeur théorique, atteignant 130 %.

Ces résultats mettent en évidence le rôle déterminant de l'occupation du sol dans la préservation des polémoformes (tab. 3.2), la forêt apparaissant comme le milieu le plus conservatoire. Les taux les plus élevés concernent les secteurs à forte couverture forestière, notamment le Massif de Saint-Thierry (49 % de conservation pour 63 % de forêt), tandis que les avant-buttes plus ouvertes, à dominante agricole ou viticole, présentent des linéaires largement effacés (6 % de conservation). La comparaison diachronique des tracés de 1918 et des formes détectées au LiDAR (2023) confirme cette opposition nette entre milieux boisés et espaces cultivés, déjà observée sur d'autres théâtres de guerre à Verdun (De Matos-Machado, 2018), Reims (Devos et al., 2021) ou en Flandres (Stichelbaut, 2009).

Toutefois, ces chiffres ne portent que sur le tracé des tranchées et boyaux, aujourd'hui fortement atténués par comblement ou remblaiement, comme l'indiquent les profils transversaux (fig. 4.38 ; Brénot et al., 2017). En se limitant aux espaces forestiers, les taux de conservation deviennent plus élevés mais aussi très hétérogènes, pouvant dépasser 100 % (tab. 5.24). Cette variabilité s'explique à la fois par les pratiques sylvicoles et par la maturité des peuplements, mais révèle surtout un biais méthodologique lié à la comparaison de sources également hétérogènes en partie signalé par Taborelli (2018) et Devos et al. (2021).

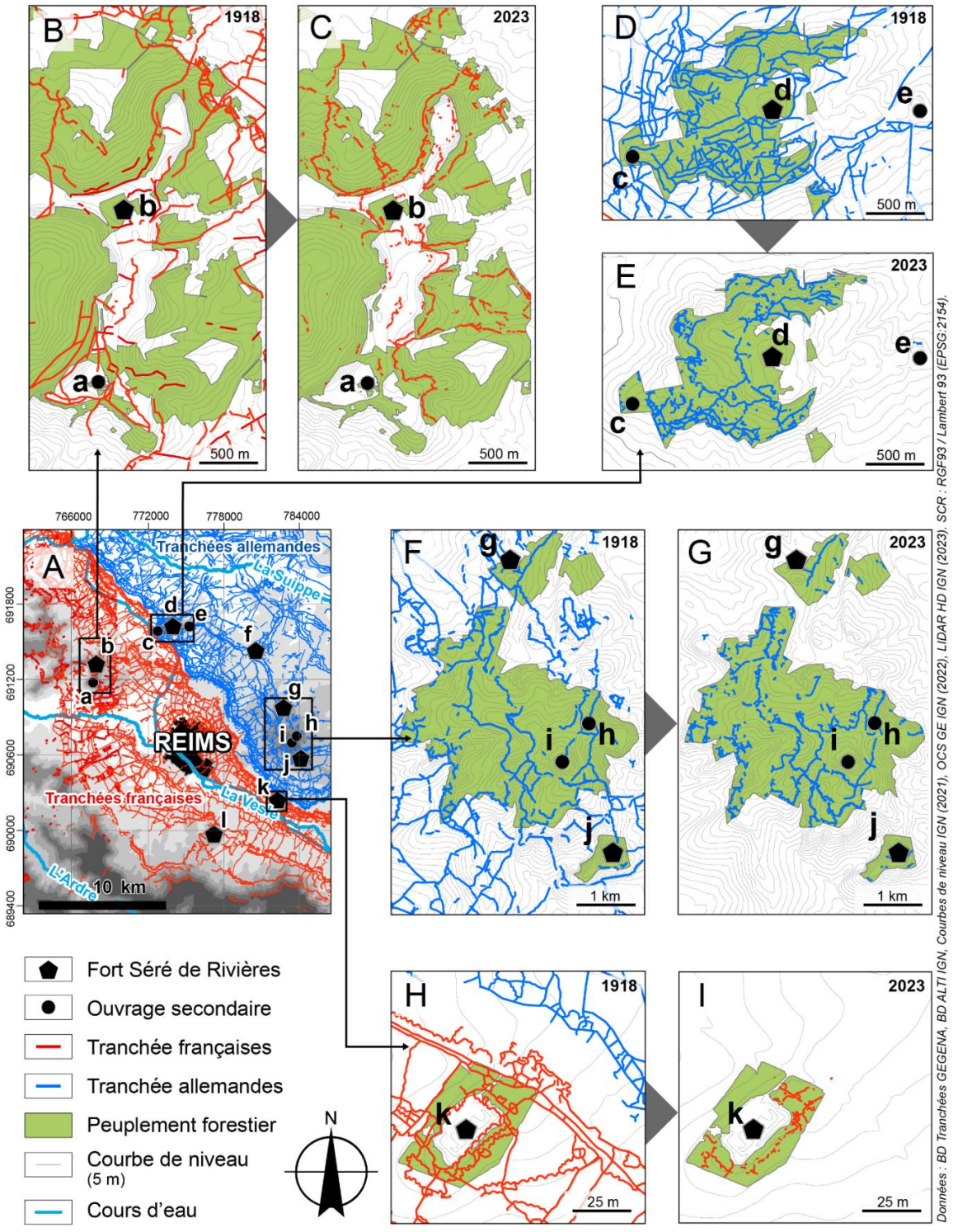


Figure 5.67 : Détermination du taux d'effacement des tranchées de la Grande Guerre par la comparaison des plans directeurs des GCTA (1918) et des données LIDAR HD (2023). A : Réseaux de tranchées autour de Reims en 1918 ; B-C : Réseau de tranchées du Massif de Saint-Thierry en 1918 et en 2023 ; D-E : Réseau de tranchées de la butte de Brimont en 1918 et en 2023 ; F-G : Réseau de tranchées de la butte de Berru en 1918 et en 2023 ; H-I : Réseau de tranchées du secteur de la Pompelle en 1918 et en 2023.

Le linéaire de référence de 1918 est issu de plans directeurs synthétiques à moyenne échelle, tandis que le linéaire actuel est mesuré à partir de données LIDAR HD, beaucoup plus

fines. Ce décalage scalaire, associé à la stylisation des tracés anciens, induit mécaniquement des surestimations locales du taux de conservation, posant la question des limites méthodologiques de ce type de calcul, qui ne sera pas discutée dans le cadre de cette thèse.

	MNT LiDAR		*Plans directeurs*	
Tranchée	*Linéaire (m)*	*lin. (m) / km² (sous forêt)*	*Linéaire théorique en m (sous forêt)*	*Ratio linéaire / linéaire théorique*
MdBr	18 646	3 729 (12 431)	61 616 (28 182)	30 % (66 %)
MdBe	42 541	2 239 (6 861)	100 180 (32 240)	42 % (132 %)
MdST	21 144	2 643 (4 405)	43 196 (24 973)	49 % (85 %)
Autres	1 951	650 (8 483)	31 508 (5 386)	6 % (36 %)
Total / moyenne	84 282	2 315 (8 045)	236 500 (90 783)	36 % (93 %)

Tableau 5.24 : Statistiques relatives à la conservation des tracés des tranchées et boyaux établies à partir des données LiDAR et des plans directeurs des GCTA. Le taux de conservation se lit à travers le ratio linéaire réel / linéaire théorique présenté dans la dernière colonne. MdBe : Mont de Berru ; MdBr : Mont de Brimont ; MdST : Massif de Saint-Thierry ; Autres : Secteurs des forts de Fresne, Montbré et la Pompelle.

5.3.1.2. Voies ferrées

La deuxième catégorie de polémoformes linéaires de la Première Guerre mondiale correspond aux voies ferrées à faible écartement, dont environ trois kilomètres ont été inventoriées sur la butte de Berru (tab. 5.23 ; fig. 5.68A-D).

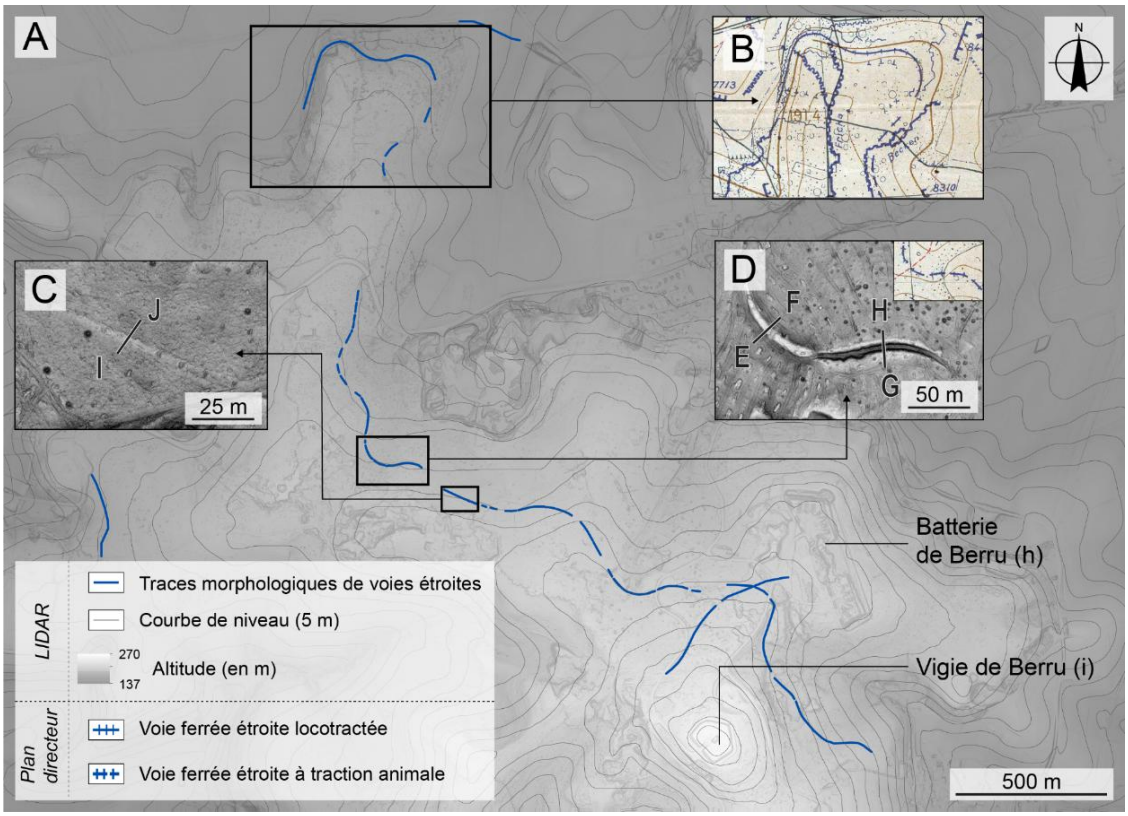


Figure 5.68 : Ensemble des traces morphologiques de voies étroites (infrastructures) inventoriés sur le Mont de Berru. Les profils topographiques correspondant aux tracés noirs sont représentés sur la **figure 5.70**. A : MNT LiDAR IMPACT 14-18 (GEGENA, 2015) ; B : Extrait du plan directeur de Beine NE au 1/10 000 du 17 mai 1918 centré sur un ensemble septentrional de voies ferrées ; C : Vue en plan d'une voie à flanc de coteau ; D : Vue en plan d'une voie en déblais (à droite) puis en remblais (partie gauche ; fig. 5.70).

Massivement construites sur l'ensemble du front, ces lignes assurent le transport rapide et régulier de troupes et de matériel (armes, munitions, artillerie, *etc.*) entre l'arrière et les positions de combat, au moyen de wagons hippotractés ou tractés par locomotive (fig. 5.69A-D).

Contrairement aux tranchées, qui demeurent des creusements même atténués, le terme de « voie ferrée » renvoie par métonymie à un dispositif fonctionnel complet associant l'infrastructure (plateforme, ouvrages d'art, terrassements, chemin d'accès) et la « superstructure » (rails, traverses, ballast, *etc.* ; Ministère de la Guerre, 1929).

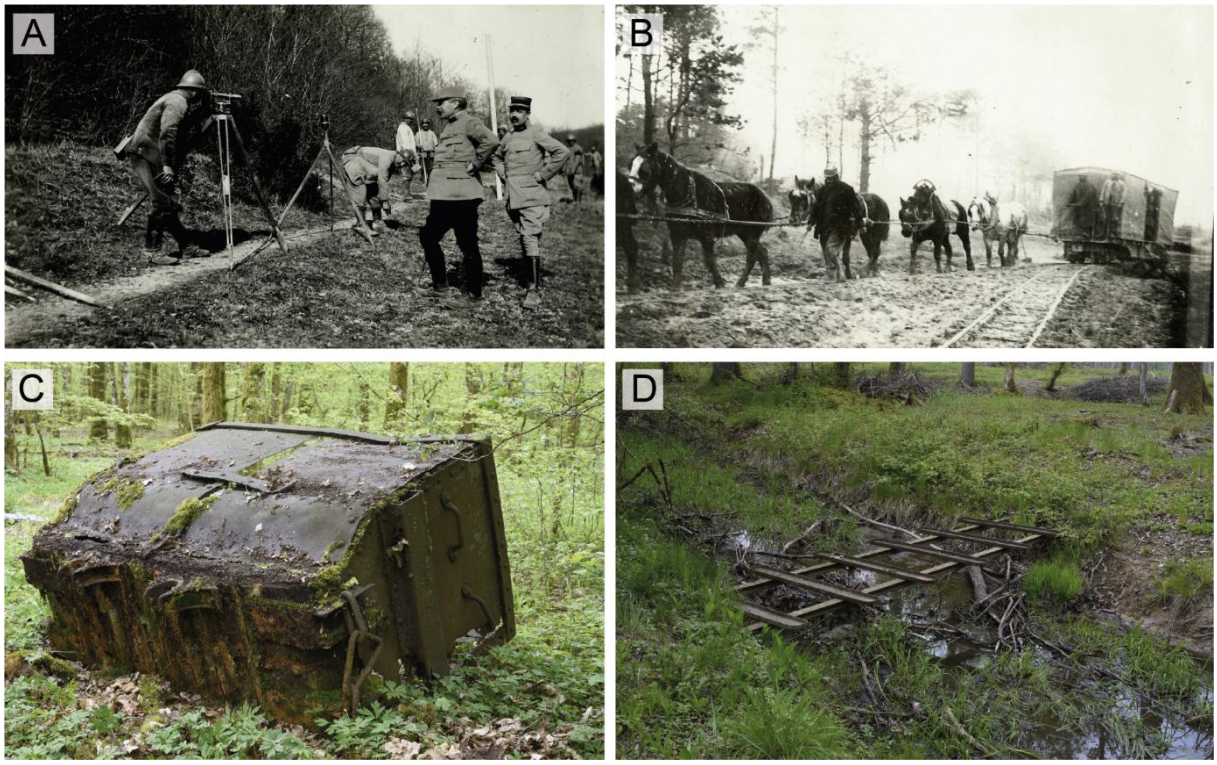


Figure 5.69 : Photographies relatives aux voies étroites de la Première Guerre mondiale. A : Levée de terrain, étude d'un tracé de voie de 0.60 (Verdun, novembre 1916 ; source : étude militaire sur le service de la voie de 0.60 de 1917, archive personnelle) ; B : Traction animale en Champagne (non datée ; source : étude militaire sur le service de la voie de 0.60 de 1917, archive personnelle) ; C : Wagonnet issu du service allemand de voies étroites en forêt de Spincourt (3 mai 2019) ; D : Morceau de voie ferrée allemande en forêt de Spincourt (3 mai 2019).

Les vestiges morphologiques actuels proviennent surtout de l'infrastructure, la superstructure ayant presque complètement disparu (*e.g.*, vestiges archéologiques en forêt de Spincourt, Meuse ; fig. 5.69C-D). Ils correspondent généralement à des plateformes stables, construites en remblais ou en déblais (*i.e.*, sur levée de terre ou en fossé), sur terrain plat ou en pente et recouvertes de ballast (5.68A-D, 5.70). Leur largeur varie entre 2 à 5 m au sommet en fonction de l'écartement des voies implantées, qui est métrique ou pluridécimétrique (*e.g.*, 60 cm ; fig. 5.71A-B). Le tracé, à faible courbure et grande extension et le mode de construction dépendent de la nature du terrain (plus large et nécessitant un

drainage renforcé en milieu argileux) et de la déclivité (création de ruptures de pente ; fig. 5.70).

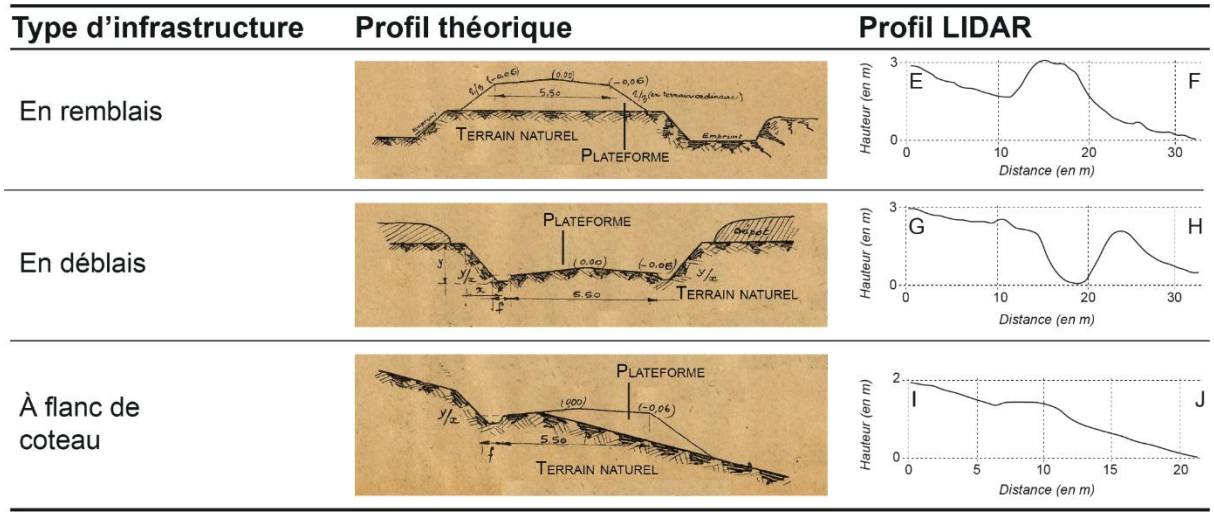


Figure 5.70 : Typologie des infrastructures de voies ferrées normales (d'après Ministère de la Guerre, 1929) dont les différentes morphologies présentées sont transposables aux voies étroites. Le tracé des profils topographiques est représenté sur la figure 5.68A-D.

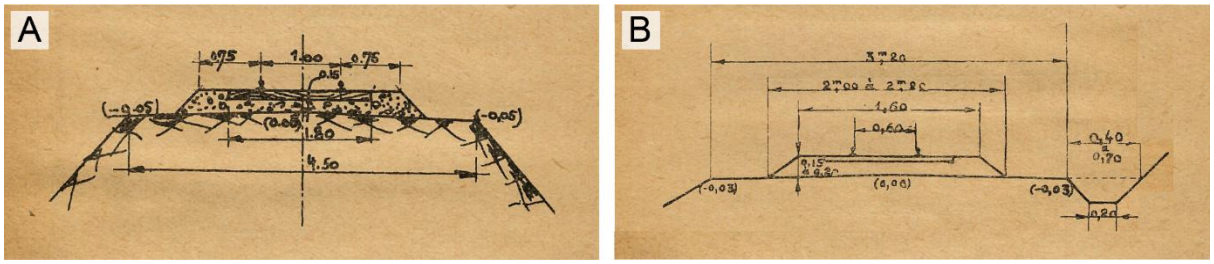


Figure 5.71 : Profils en travers de la plateforme selon l'écartement de la voie ferrée (Ministère de la Guerre, 1929). A : Écartement métrique ; B : Écartement de 60 cm.

5.3.1.3. Épaulements d'origine militaire

La dernière catégorie de formes linéaires liées à la Première Guerre mondiale correspond à 9,1 km d'épaulements cartographiés dans les espaces agricoles ceignant la butte de Berru. Leur état est indifférencié car l'érosion liée aux usages agricoles tend à ne conserver que des ruptures de pente ténues, d'apparence très semblable quelle qu'en soit l'origine, liée tant à la circulation (voie, sentier), qu'à la communication (ligne téléphonique) ou à des positions d'artillerie et de tranchées. La figure 5.72A-D présente ainsi l'exemple d'un linéaire dont la localisation au nord de la butte coïncide spatialement avec des figurés représentant une ligne téléphonique et une tranchée à traverses en U et tournantes sur un plan directeur de 1917.

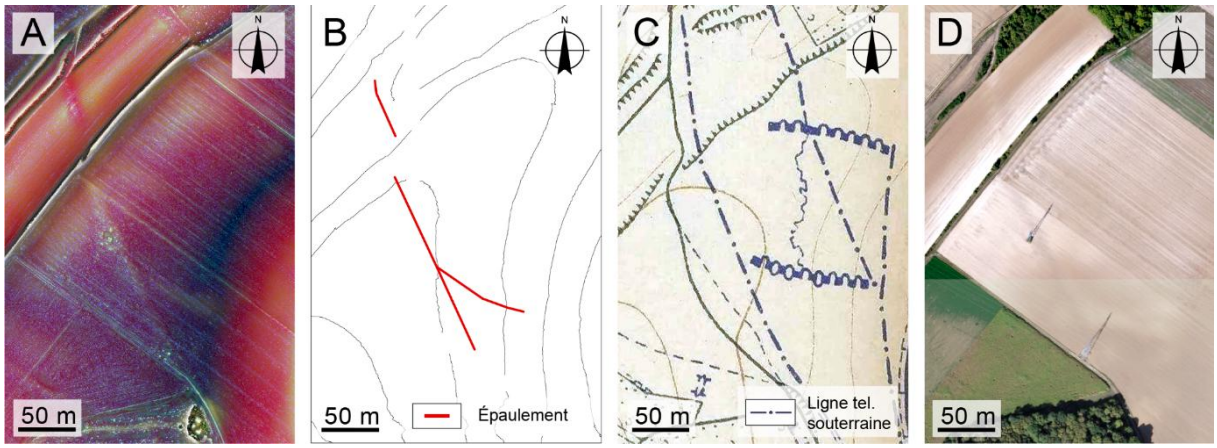


Figure 5.72 : Exemple d'épaulement d'origine militaire situé en milieu agricole. A : MNT LIDAR HD (2023) traité visuellement (e⁴MSTP) ; B : Épaulements digitalisés ; C : Plan directeur de Berru au 1/10 000 du 29 octobre 1917 ; D : Orthophotographie IGN (BD ORTHO®, 2019).

L'étude conjointe des voies ferrées étroites, des épaulements d'origine militaire et des tranchées et boyaux dresse ainsi le panorama des principaux réseaux linéaires de la Grande Guerre lisibles dans le secteur. Après ces formes à développement continu, l'inventaire se concentre sur les polémoformes ponctuelles présentées dans la partie suivante.

5.3.2. Polémoformes ponctuelles

Les polémoformes ponctuelles inventoriées se répartissent entre les structures militaires, dont les positions d'artillerie, et les cratères d'obus.

5.3.2.1. Structures militaires

Le terme généraliste de « structure » est ici employé pour désigner l'ensemble des constructions et aménagements attribués à la Première Guerre mondiale. Ces entités morphologiques n'ont pas été caractérisées individuellement de manière exhaustive, à l'exception des positions d'artillerie (de campagne et lourde) traitées séparément.

Les structures militaires correspondent initialement à un éventail d'ouvrages s'organisant au sein des différentes positions défensives, liés (Taborelli et al., 2017b) :

- aux combats d'infanterie (postes avancés, à mitrailleuses, trous individuels) ;
- à la protection rapprochée (abris de section, casemates, abris-caverne, niches) ;
- à l'artillerie (positions d'artillerie) ;
- à la logistique (dépôts), aux observatoires ;
- au commandement (postes de commandement) ;
- au cantonnement (camps, villages nègres, *etc.*).

L'inventaire a recensé environ 2 200 structures affiliées à la Première Guerre mondiale, presque toutes sous couvert forestier (tab. 5.25). La moitié est localisée sur la butte-témoin de Berru, plus d'un tiers sur le Massif de Saint-Thierry et environ 14 % sur la butte de Brimont. Rapportée à la surface forestière, la tendance s'inverse au même titre que les tranchées avec respectivement 172, 173 et 202 structures au km².

	Structures militaires (dont positions d'artillerie)	*dens. surf. [/ km²] (sous forêt)*	Cratère d'obus	*dens. surf. [/ km²] (sous forêt)*	Total *(sous forêt)*
MdBr	303 (22)	61 (202)	4 479	896 (2 986)	4 953
MdBe	1 023 (99)	56 (172)	16 381	862 (2 642)	18 699
MdST	835 (46)	104 (173)	2 855	357 (595)	3 683
Autres	4	1 (17)	565	188 (2 457)	676
Total	2 199	55 (141)	24 280	576 (2 170)	28 011

Tableau 5.25 : Statistiques relatives aux polémoformes de la Première Guerre mondiale cartographiées avec des entités ponctuelles. MdBe : Mont de Berru ; MdBr : Mont de Brimont ; MdST : Massif de Saint-Thierry. Autres : Secteurs des forts de Fresne, la Pompelle et Montbré.

Le croisement avec les plans directeurs et les prospections pédestres, réalisées pendant la thèse et avant, par Devos et al. (2019b ; annexe 49), ont permis d'obtenir l'aperçu général le plus complet sur la butte de Brimont. Ces recherches ont mis en évidence l'existence de postes de commandement et de sites d'artillerie de tranchées (*Minenwerfer* allemands), notamment à l'est de la batterie de Loivre (fig. 5.73A-C), de nombreuses entrées d'abri-

caverne sur le versant nord (fig. 5.74A-B) et des observatoires (fig. 5.74C-E). Ces derniers, souvent bétonnés avec un orifice circulaire au plafond permettant de glisser un périscope, assurent aux défenseurs une vue favorable sur le dispositif français (Devos et al., 2019b). Ils sont toutefois difficilement reconnaissables sur le LiDAR du fait de leur petite taille et de leur fréquente suppression lors de l'interpolation du MNT issu du LiDAR IMPACT 14-18 de 2015 utilisé dans cette étude.

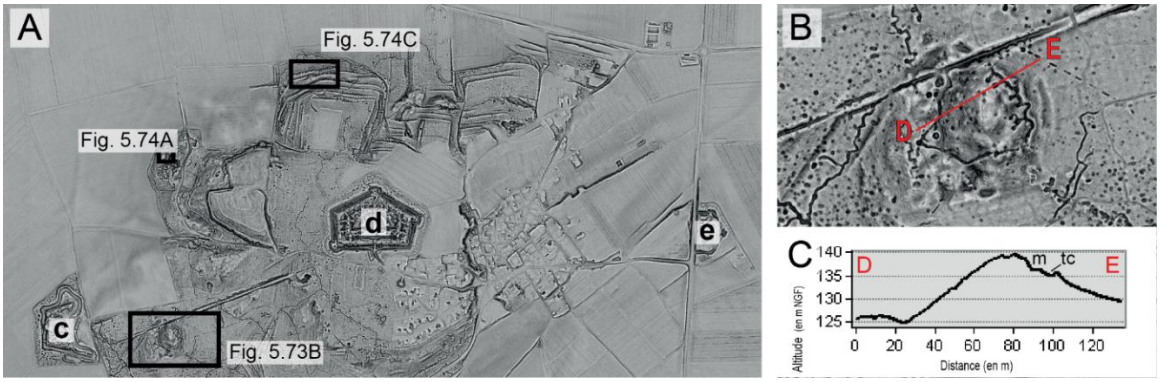


Figure 5.73 : Emplacements de *Minenwerfer* situés à contrepente d'un petit relief au sud-est de la butte de Brimont. A : MNT LIDAR HD (2023) traité visuellement (pente + LRM en transparence) de la butte de Brimont ; B : Agrandissement sur le site des *Minenwerfer* ; C : Profil topographique associé. c : Batterie de Loivre ; d : Fort de Brimont ; e : Batterie du Cran de Brimont ; m : Emplacement de *Minenwerfer* ; tc : Tranchée de communication ou boyau.

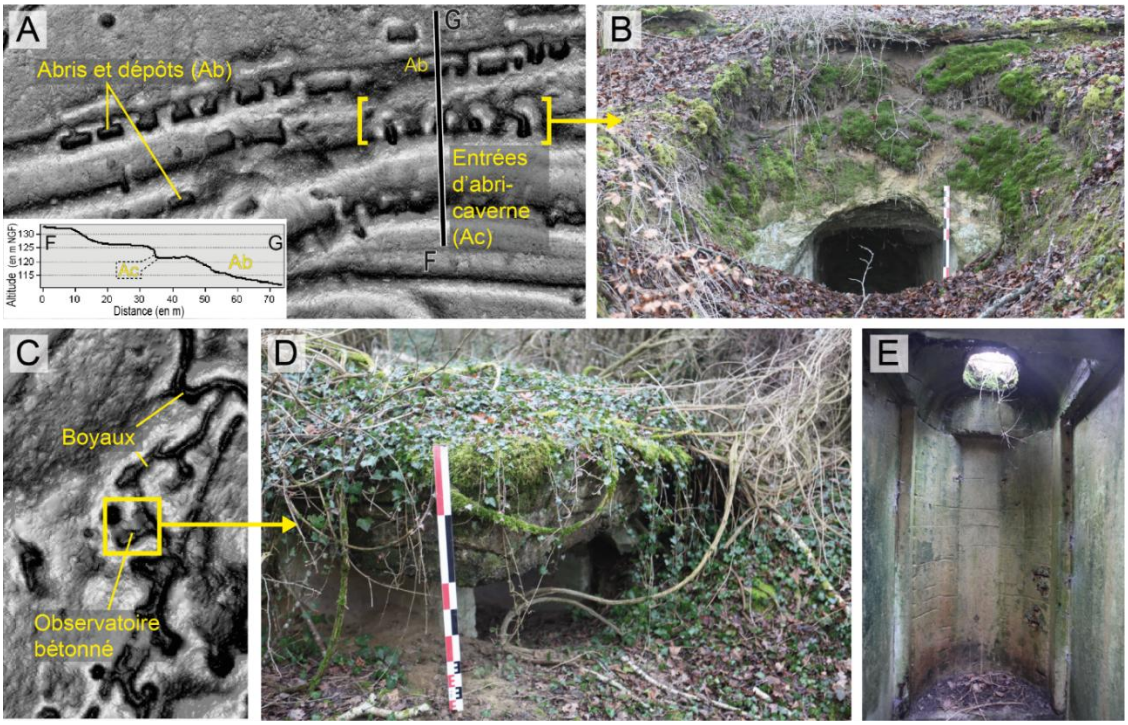


Figure 5.74 : Exemples de structures caractérisées lors des prospections pédestres ; MNT LIDAR HD (2023) traité visuellement (pente + LRM en transparence). Les vignettes A et C sont localisées sur la **figure 5.73A**. A : Camp allemand composé de multiples structures matérialisant l'emplacement d'abris et de dépôts sur le versant nord de la butte de Brimont ; B : Entrée d'un abri-caverne disposé sur le versant ; C : Ensemble de boyaux situés au nord-ouest de la butte ; D : Dalle de béton sommitale d'un observatoire ; E : Poste d'observation bétonné (clichés : Alain Devos).

L'agglomération de plusieurs structures d'intendance et de logistique peut former des camps placés de façon pragmatique dans les espaces les plus favorables, correspondant ici aux contre-pentes (fig. 5.74A). Des camps sont également visibles sur la butte de Berru et le Massif de Saint-Thierry, en s'égrenant, de la même manière, à contrepente des directions dangereuses (fig. 5.75A-B).

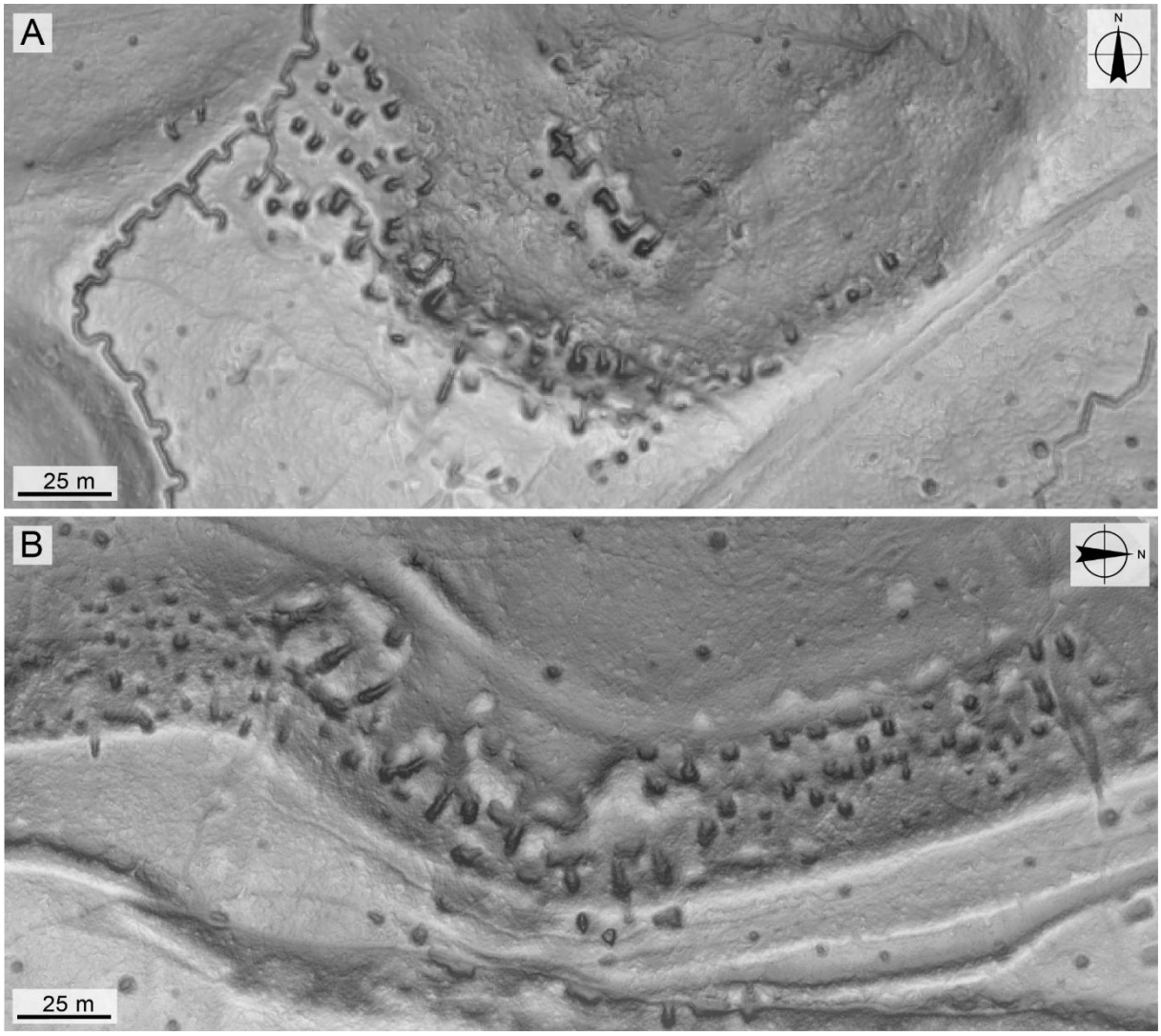


Figure 5.75 : Exemples de cantonnements révélés par le LiDAR (MNT LIDAR HD traité visuellement, pente + LRM en transparence) dans les secteurs de la butte de Berru (A) et du Massif de Saint-Thierry (B). Les aplats les plus clairs ont une altitude plus élevée que les plus sombres.

Sur le Massif de Saint-Thierry, le LiDAR met en évidence des traces d'exploitation extractive très intense, notamment dans les calcaires lutétiens qui arment la côte d'Île-de-France (fig. 5.1 ; *cf.* partie 5.4.1.3). Ces matériaux ont pu être exploités à ciel ouvert comme en souterrain (fig. 5.76A-D). Si l'intégration des carrières à ciel ouvert aux réseaux de défense (tranchées, positions d'artillerie) est bien documentée, celle des carrières souterraines (les « creutes ») l'est beaucoup moins dans ce secteur, leur présence n'ayant jamais été démontrée à la connaissance de l'auteur. Or, Devos et al. (2019a) montrent, trois

kilomètres plus à l'ouest, sur le front de côte d'Hermonville, que de telles carrières souterraines ont bien été réaménagées et intégrées à la 4e position défensive française. Le LiDAR y révèle notamment des chemins de roulage convergeant vers des bouches de cavage échancrant le versant, desservis par des boyaux perpendiculaires au front de côte (fig. 5.76A-C). Ces observations illustrent les potentialités offertes par les faciès lutétiens pour le creusement et l'aménagement d'abris souterrains et invitent à considérer, à Saint-Thierry, l'éventualité d'une intégration similaire de creutes aux réseaux de défense.

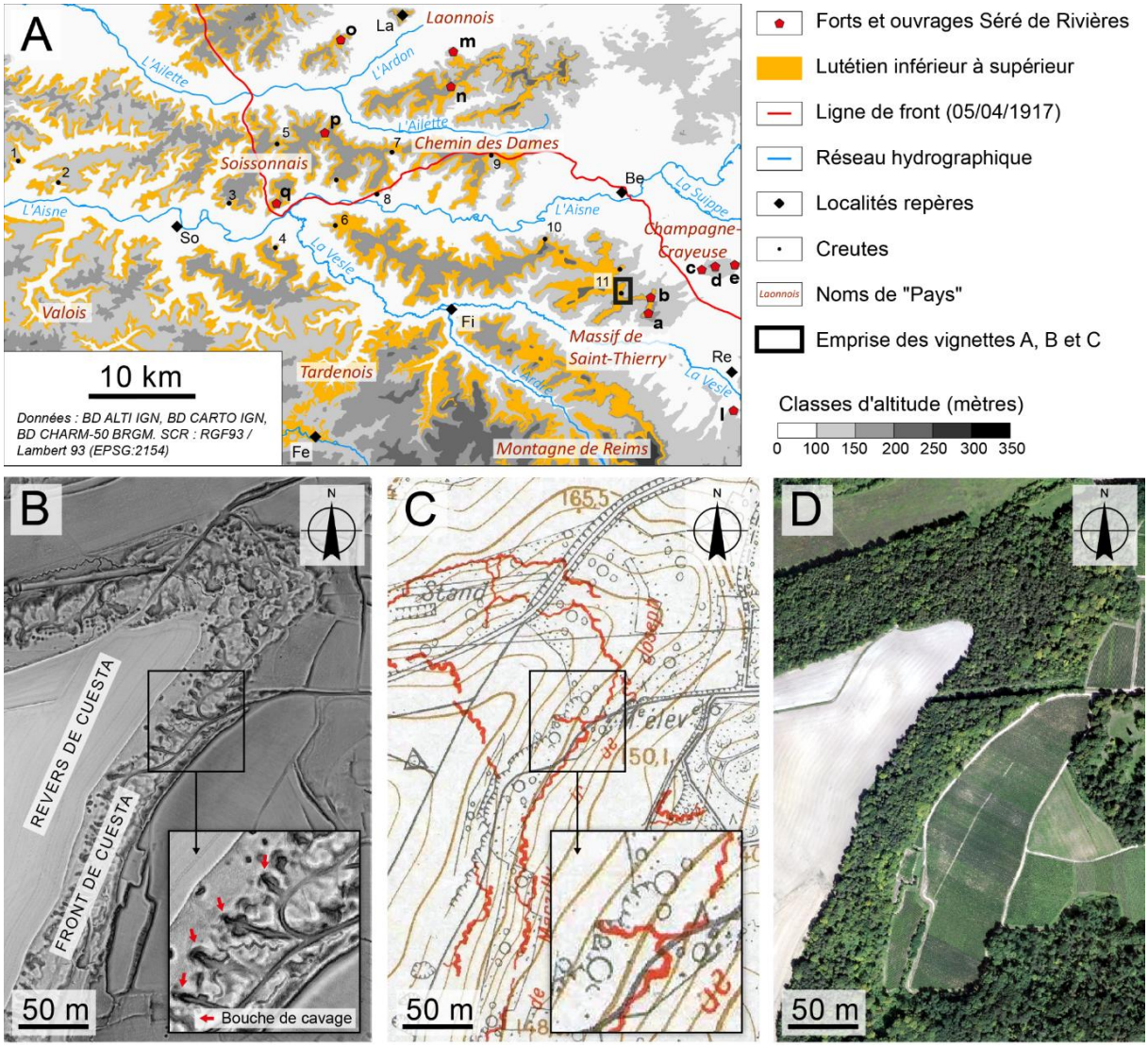


Figure 5.76 : Creutes d'Hermonville-Marzilly : indices morphologiques et intégration aux réseaux de défense. A : Localisation des creutes (d'après Devos et al., 2019a) ; B : MNT LIDAR HD traité visuellement (pente + LRM en transparence) ; C : Plan directeur de Berry-au-Bac SE au 1/10 000 du 1er mai 1918 ; D : Orthophotographie IGN (BD ORTHO® 2019). a : Réduit de Chany ; b : Fort de Saint-Thierry ; c : Batterie de Loivre ; d : Fort de Brimont ; e : Batterie du Cran de Brimont ; l : Fort de Montbré ; m : Fort de Bruyères (place de Laon) ; n : Fort de Montbérault (place de Laon) ; o : Fort de Laniscourt (place de Laon) ; p : Fort de la Malmaison (place de Laon) ; q : Fort de Condé (place de Laon) ; Be : Berry-au-Bac ; Fe : La Fère-en-Tardenois ; Fi : Fismes ; La : Laon ; Re : Reims ; So : Soissons. 1 : Sainte-Victor ; 2 : Confrécourt ; 3 : Bucy-le-Long ; 4 : Ciry-Salsogne ; 5 : Frutty ; 6 : Chassemy ; 7 : Rouge Maison ; 8 : Soupir ; 9 : Caverne du Dragon ; 10 : Roucy ; 11 : Hermonville-Marzilly.

5.3.2.2. Positions d'artillerie

Parmi les structures inventoriées, environ 7 % correspondent à des positions d'artillerie, réparties entre les secteurs selon les mêmes proportions. Les positions d'artillerie visibles aujourd'hui au LiDAR constituent une catégorie de polémoformes de la Grande Guerre à forte variabilité morphométrique : formes, dimensions et complexité varient selon de multiples facteurs évoqués par les manuels militaires (capacité d'accueil, fonction, résistance, matériaux, nature du terrain) et selon leur état de conservation (De Matos-Machado, 2018). Ces positions, généralement organisées en batteries de quatre, présentent un terre-plein central supportant une plate-forme d'artillerie protégée par des parapets frontaux et latéraux (merlons ou bourrelets pare-éclats ; fig. 5.77).

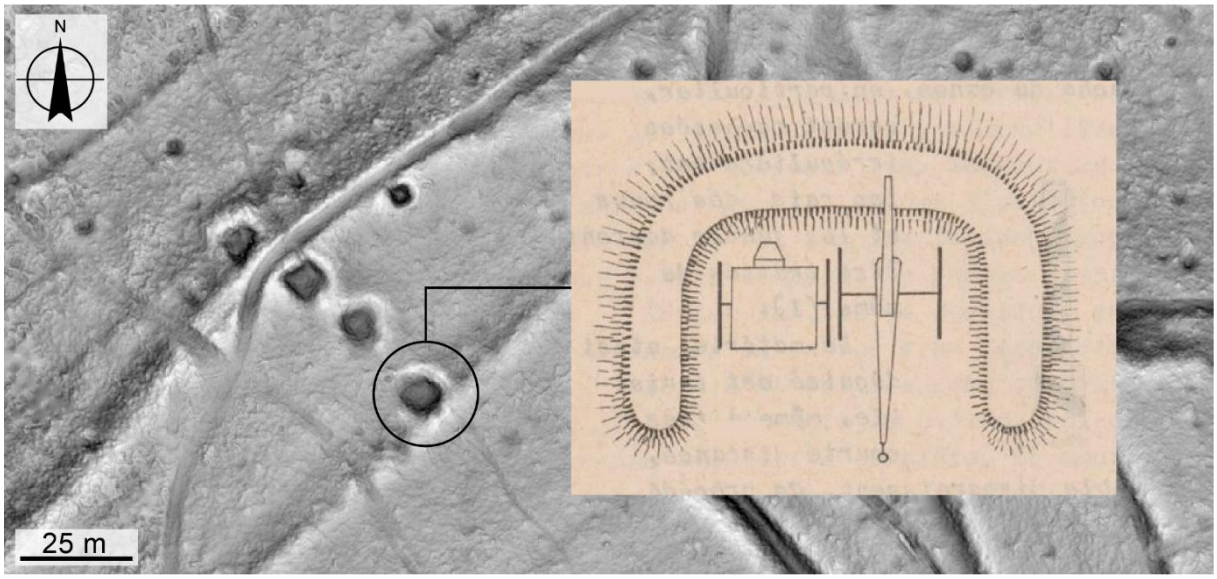


Figure 5.77 : Signatures morphologiques relatives à une batterie française de quatre canons dans le Massif de Saint-Thierry (d'après Taborelli, 2018 ; source : Ministère de la Guerre, 1915).

Elles peuvent se complexifier par la présence d'abris annexes destinés au stockage terminal des munitions ou à la protection des troupes, par des boyaux reliant les positions entre elles, ou encore par l'usage de casemates bétonnées (fig. 5.78). Deux batteries, dévolues à l'artillerie de campagne (fig. 5.79A-C) et à l'artillerie lourde (fig. 5.80A-C), illustrent par exemple des aménagements bétonnés importants entrepris par l'armée allemande sur la butte de Brimont. Toutes les batteries d'artillerie n'ont cependant pas un caractère morphogène marqué : certaines étaient dépourvues de défense rapprochée ou possédaient des casemates non bétonnées dont les matériaux périssables ont disparu (Stichelbaut, 2009). Stichelbaut propose ainsi une typologie en dix classes, fondée sur la taille, la forme, le nombre d'épaulements et d'abris annexes et la fonction (artillerie de campagne, aérienne, de côte, *etc.*). Plus récemment, Perarnau et al. (accepté) suggèrent de prendre en compte la complexité spatiale induite par les relations entre emplacements et structures annexes dans l'arrière de la quatrième position défensive de la Montagne de Reims.

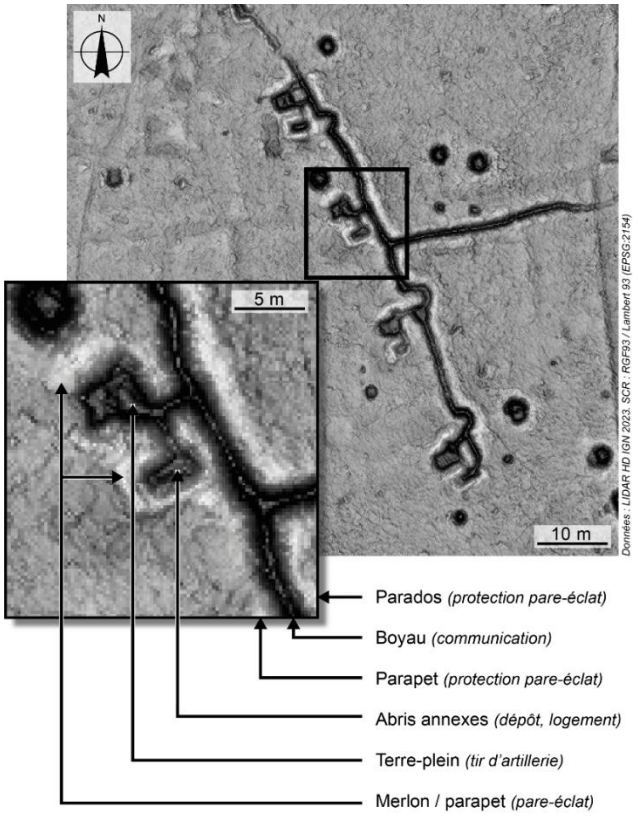


Figure 5.78 : Batterie d'artillerie dont la morphologie est complexifiée par l'existence d'un boyau de communication et d'abris annexes.

Ces typologies issues de la littérature fournissent un cadre de lecture qui permet d'interpréter l'inventaire réalisé. L'analyse des positions d'artillerie du Massif de Saint-Thierry et des buttes-témoins présentée ci-après s'y inscrit en reprenant les principaux critères tout en les appliquant à l'échelle locale pour mettre en évidence un gradient de complexité morphologique (forme et structures annexes) et spatiale propre à chaque secteur (répétition morphologique, organisation ; fig. 5.81A-X).

Dans le Massif de Saint-Thierry, côté français pendant la guerre de tranchées, une large part des positions adoptent un plan orthogonal avec ensemble terre-plein/parapet et, plus rarement, un abri annexe. La complexité spatiale augmente avec la distance et se traduit par une rupture progressive de l'alignement (fig. 5.81A-D). Une seconde catégorie tend vers des formes polygonales accompagnées d'abris annexes systématiques. L'organisation spatiale passe alors d'un alignement strict à un agencement en quinconce, voire totalement désaxé (fig. 5.81E-H).

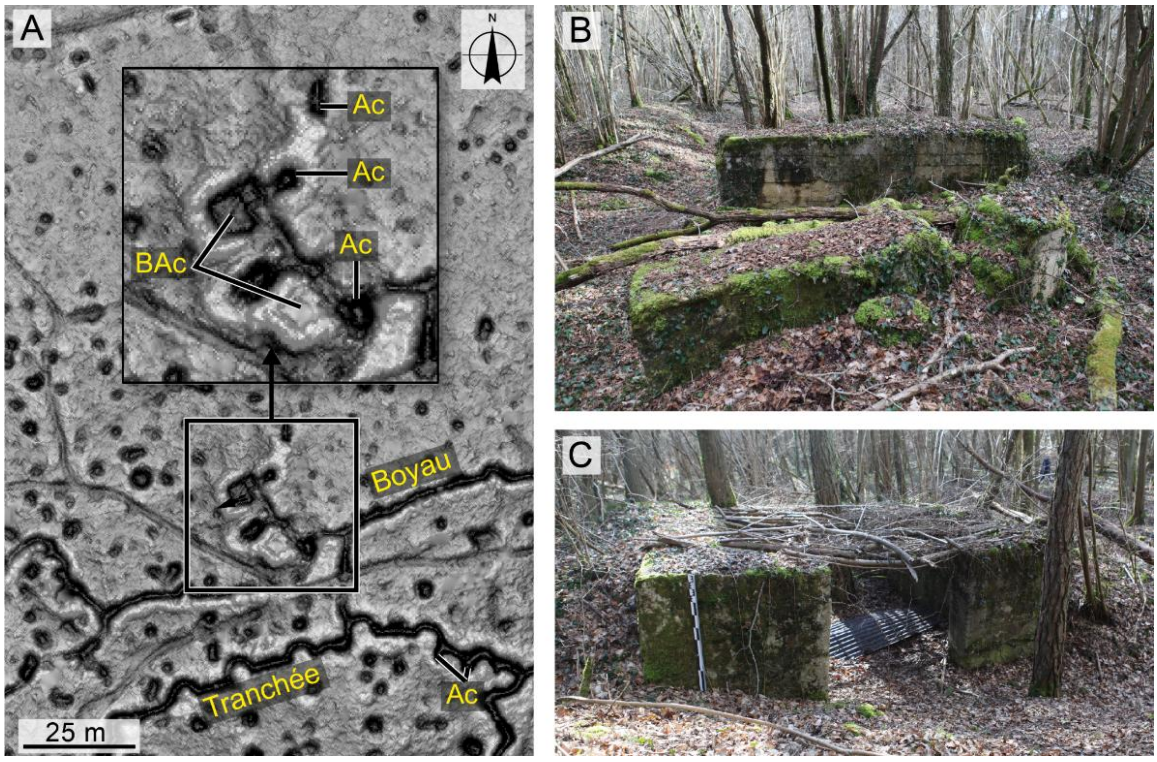


Figure 5.79 : Batterie de campagne à tir tendu à deux emplacements sur le flanc ouest de la butte de Brimont (d'après Devos et al., 2019b). A : MNT LIDAR HD (2023) traité visuellement (pente + LRM en transparence) B : Structure associée n°1 (cl. : Alain Devos) ; C : Structure associée n°2 (cl. : Alain Devos). Ac : Abri-caverne ; BAc : Batterie d'artillerie de campagne.

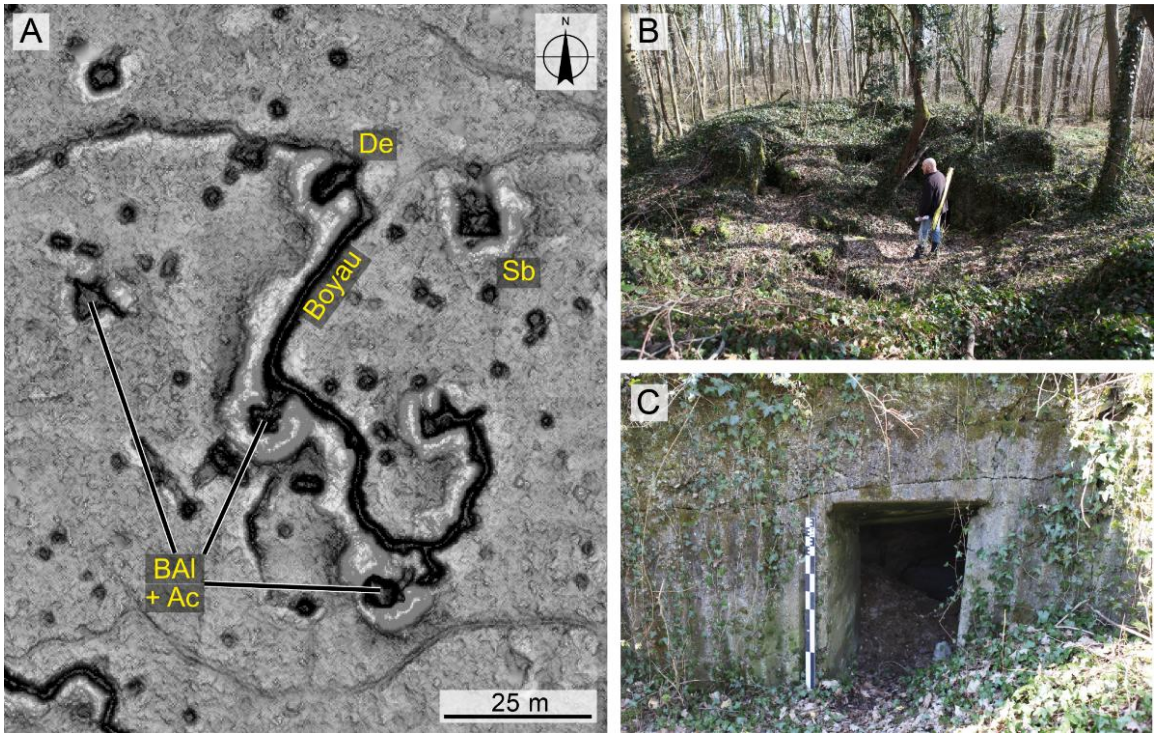


Figure 5.80 : Batterie d'artillerie lourde, à trois emplacements partiellement connectés par un boyau, au sommet de la butte de Brimont (d'après Devos et al., 2019b). A : MNT LIDAR HD (2023) traité visuellement (pente + LRM en transparence) ; B : terre-plein de tir avec bourrelet pare-éclats ; C : Entrée d'abri-caverne en béton (cl. : Alain Devos). Ac : Abri-caverne ; BAl : Batterie d'artillerie lourde ; De : Dépôt ; Sb : Soute en béton.

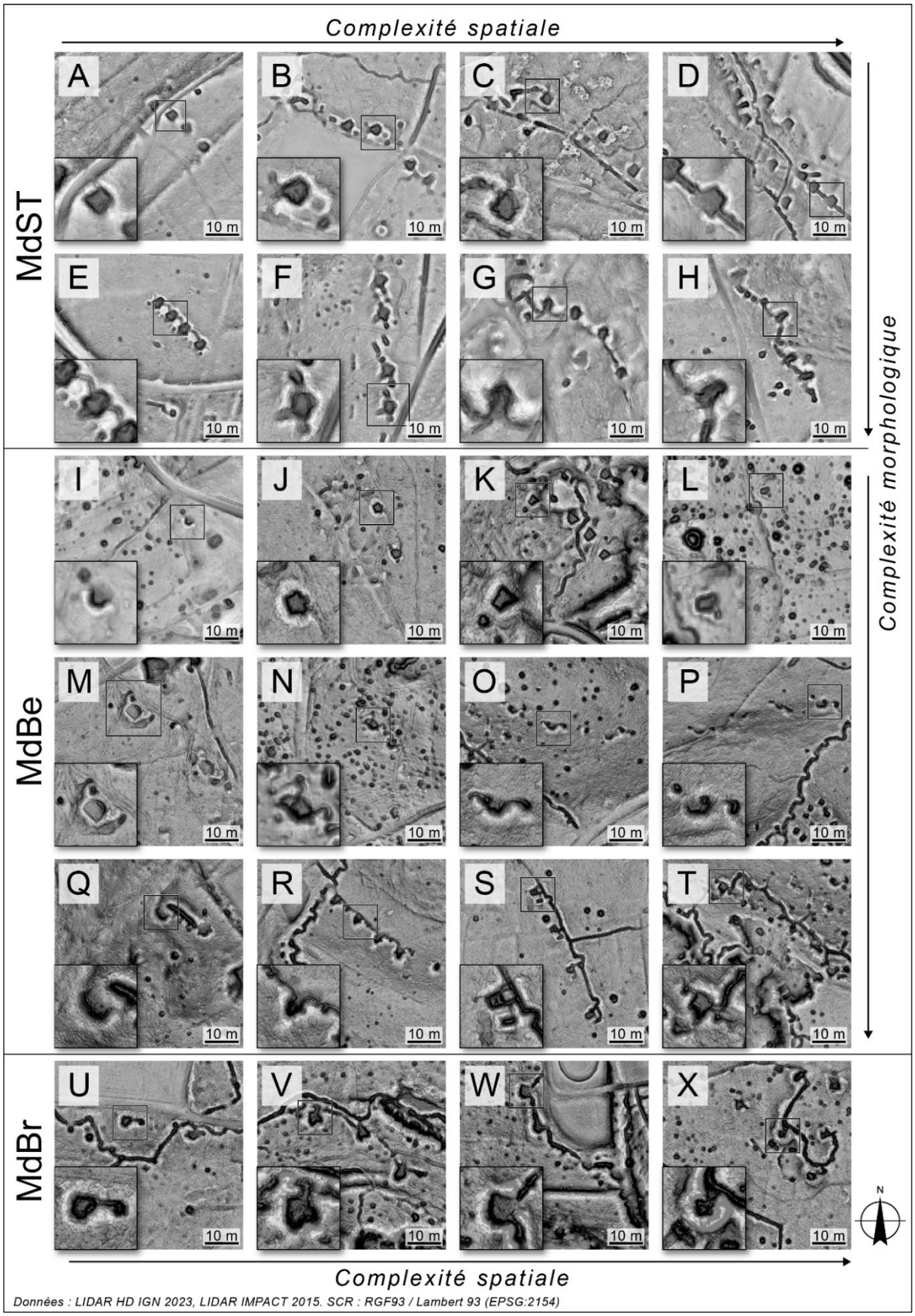


Figure 5.81 : Exemples de positions d'artillerie selon le degré de complexité morphologique et spatial (MNT LIDAR HD, 2023) traité visuellement (pente + LRM en transparence). MdBe : Mont de Berru ; MdBr : Mont de Brimont ; MdST : Massif de Saint-Thierry.

Du côté allemand, sur le Mont de Berru, les ensembles morphologiques traduisent un niveau d'élaboration plus élevé malgré la présence d'un certain nombre de positions simples (fig. 5.81I-K) ou éventuellement accompagnées d'un abri annexe (fig. 5.81L). Une seconde catégorie se dessine par la présence de deux abris latéraux et une organisation de deux à quatre positions alignées ou légèrement en quinconce (fig. 5.81M-P). Enfin, une troisième catégorie est déterminée par la présence, en plus d'annexes, d'un boyau de communication reliant les différentes positions, lesquelles sont susceptibles d'être parfaitement alignées ou d'être complètement désordonnées (fig. 5.81Q-T).

Sur la butte de Brimont, enfin, où le nombre de positions cartographiées est plus bas, le niveau de complexité est globalement plus élevé avec une dispersion planimétrique de batteries de trois-quatre positions, voire plus, presque systématique (fig. 5.81V-X).

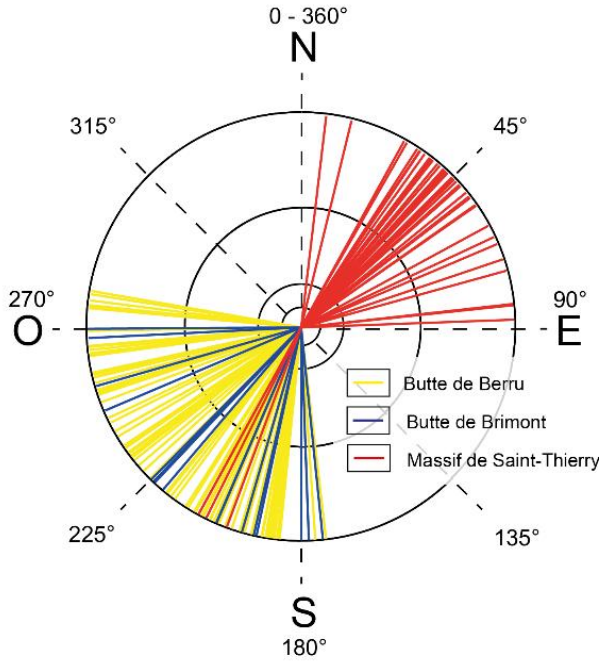


Figure 5.82 : Diagramme d'orientation des positions d'artillerie répertoriées. Les orientations correspondent à l'axe central des polémoformes.

L'analyse du diagramme d'orientation des emplacements d'artillerie traduit logiquement la position de chaque secteur par rapport à la ligne de front (fig. 5.82) :

- Sur le Massif de Saint-Thierry, placés perpendiculairement au sud-ouest, les emplacements revêtent une orientation allant de N0 à N90 surtout centrée sur N45 (nord-est).

- Les buttes de Berru et Brimont, que la ligne de front semble contourner par le sud et l'ouest, induisent des orientations qui s'intègrent presque intégralement dans le quart opposé, allant de N180 à plus de N270.

5.3.2.3. Cratères d'obus

Les cratères d'obus sont des dépressions topographiques résultant de l'explosion de la charge d'un projectile d'artillerie à l'impact. Ils ont fait l'objet d'analyses scientifiques approfondies en raison de leur valeur indicatrice de l'intensification brutale de la puissance de feu à la fin du XIXe siècle et durant la Première Guerre mondiale. Le développement de munitions à fort pouvoir morphogène a conduit les géomorphologues à proposer le terme de « bombturbation » pour désigner ces perturbations géomorphologiques profondes, souvent durables, voire irréversibles (Hupy et Schaetzl, 2006, 2008).

L'inventaire cartographique a abouti à la digitalisation d'environ 24 000 cratères d'obus dont la répartition indique une surdensité au droit des deux buttes-témoins rapportées à leur superficie, avec près des deux tiers sur le Mont de Berru et un peu plus de 18 % sur le Mont de Brimont. À l'inverse, un peu moins de 3 000 cratères ont été recensés au sein du Massif de Saint-Thierry, ce qui représente 12 % des entités pour 23 % de la surface totale des secteurs d'étude.

La morphologie des cratères résulte de paramètres multifactoriels liés, d'une part, aux propriétés physiques du sol, relativement peu profonds autour de Reims, et du sous-sol impactés (fig. 5.83A-B). Ainsi, sur les sols minces (20-40 cm) développés sur le calcaire sommital du Massif de Saint-Thierry, dur et dense, existent des impacts plus petits et moins profonds que ceux observés sur les buttes de Berru et de Brimont. En effet, sur ces deux dernières, les sols, plus épais (50 cm à 1 m), se sont formés sur les argiles plastiques et cohésives et sur les formations sableuses meubles. Les deux faciès favorisent des bords d'impact nettement plus instables.

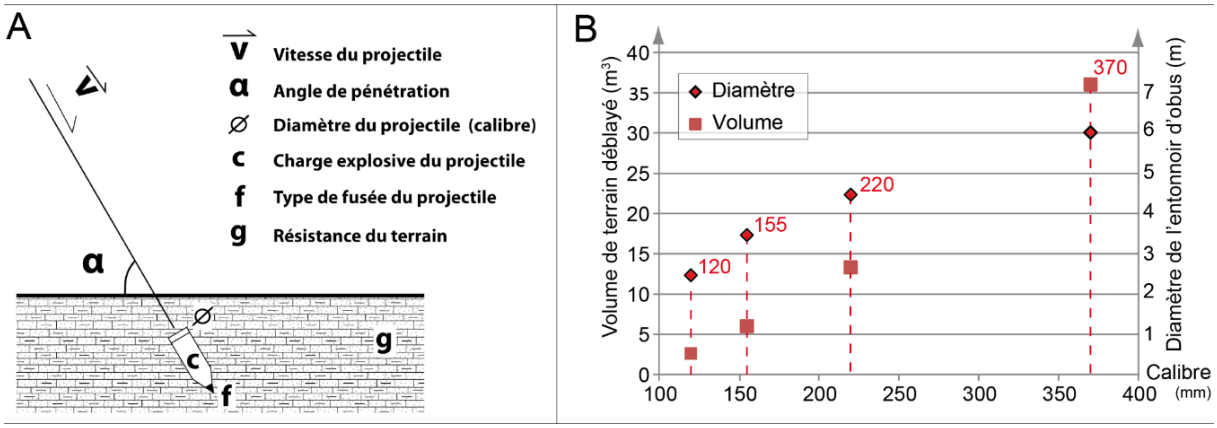


Figure 5.83 : Caractéristiques théoriques des cratères d'obus (d'après Taborelli, 2018). A : Paramètres de formation ; B : Diamètre des trous d'obus et des terres déblayées en fonction du calibre (d'après Ministère de la Guerre, 1917).

En outre, ces paramètres correspondent aux caractéristiques du tir, combinant la vitesse résiduelle lors de l'impact et l'angle d'incidence (angle entre la trajectoire du projectile et la surface au point d'impact). Ce couple de variables contrôle la profondeur de pénétration et, par conséquent, les effets du projectile, un ricochet ne déclenchant pas d'explosion et une pénétration excessive engendrant un camouflet ainsi que la formation d'un globe de décompression souterrain (au-delà de quatre longueurs de projectile ; fig. 5.84).

La forme des cratères est enfin influencée par les facteurs pyrotechniques et balistiques relatifs aux caractéristiques du projectile (fig. 5.83A). C'est notamment le cas du calibre entretenant une corrélation linéaire positive avec le volume de terrain déblayé et le diamètre du cratère (fig. 5.83B).

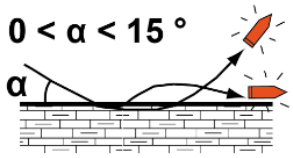
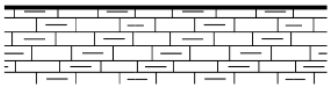
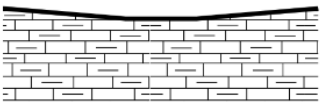
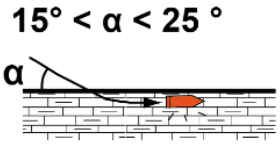
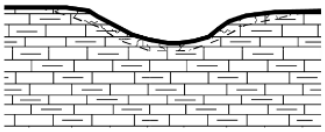
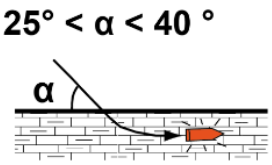
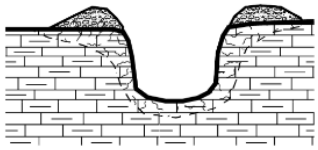
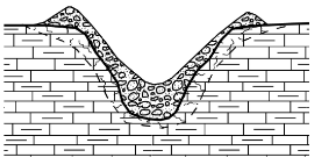
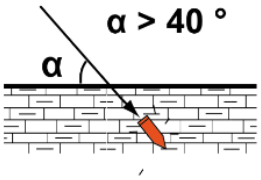
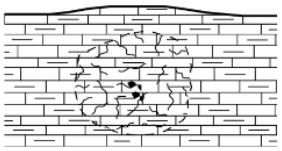
Angle d'incidence	Profondeur de pénétration	Effets	Effets morphogènes
	Nulle	Ricochet Effet fusant	
	Nulle	Ricochet Légère dépression	
	1 longueur de projectile	Dépression hémisphérique déblayée	
	1-2 longueurs de projectile	Dépression hémisphérique déblayée avec bourellet extérieur	
	3-4 longueurs de projectile	Entonnoir conique par retombée des déblais et bourrelet	
	> 4 longueurs de projectile	Camouflet Globe de décompression	

Figure 5.84 : Paramètres de formation d'un trou d'obus en fonction de l'angle de pénétration du projectile (d'après Taborelli, 2018).

Leur organisation spatiale dépend étroitement de la nature de la cible et du type de tir, pouvant relever d'un tir de réglage (calage de la hausse et de la direction), d'un tir de destruction (neutralisation d'un objectif ponctuel) ou d'un tir de barrage (couverture linéaire d'un espace destinée à protéger ou à fixer l'ennemi ; Taborelli et al., 2017b). Ces derniers, plus facilement caractérisables par leurs alignements continus de cratères serrés, voire coalescents, organisés en rideaux perpendiculaires au front, sont observables sur le flanc ouest de la butte de Berru (fig. 5.85A-B).

Dans certains secteurs, cette organisation linéaire ou ponctuelle cède cependant la place à une saturation quasi totale de l'espace par les impacts, traduisant des phases de bombardement d'une intensité exceptionnelle. L'extrémité ouest de la butte de Brimont, située en première position lors de l'offensive Nivelle du printemps 1917, en constitue l'un

des exemples les plus emblématiques dans le secteur rémois, les cratères y recouvrant presque intégralement les sols forestiers (fig. 5.86A-B).

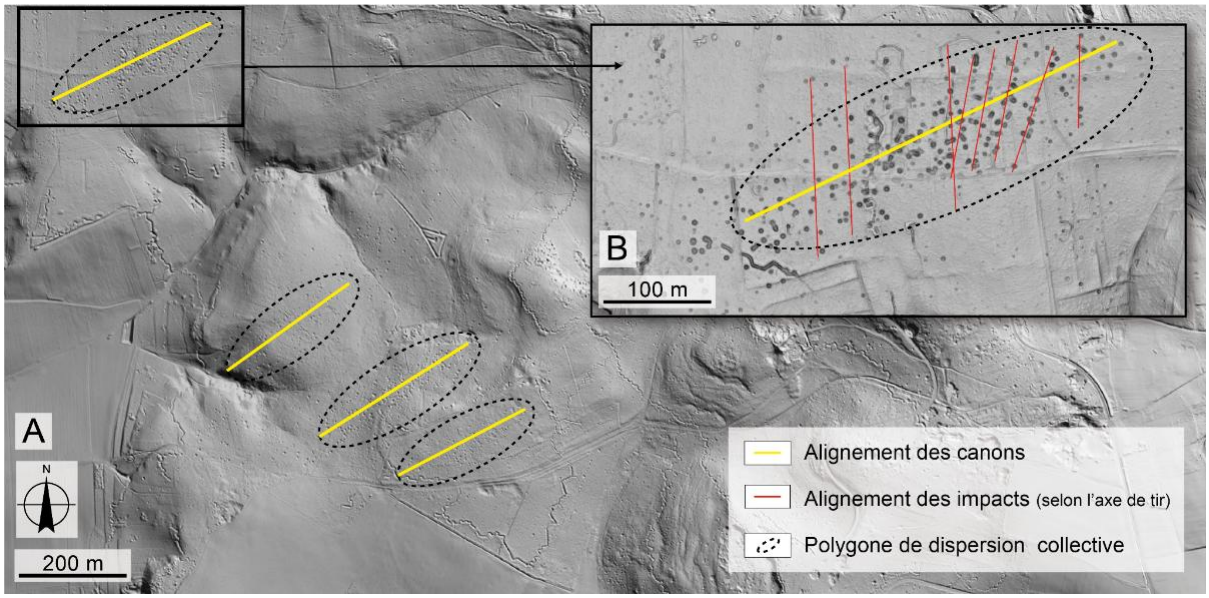


Figure 5.86 : Organisation de cratères d'obus dans le cadre d'un tir de barrage (d'après Taborelli, 2018). A : Tirs de barrage sur le versant ouest de la butte de Berru (MNT LiDAR IMPACT 14-18 traité visuellement avec un ombrage) ; B : Zoom sur un tir de barrage (MNT LIDAR HD traité visuellement, pente + LRM en transparence).

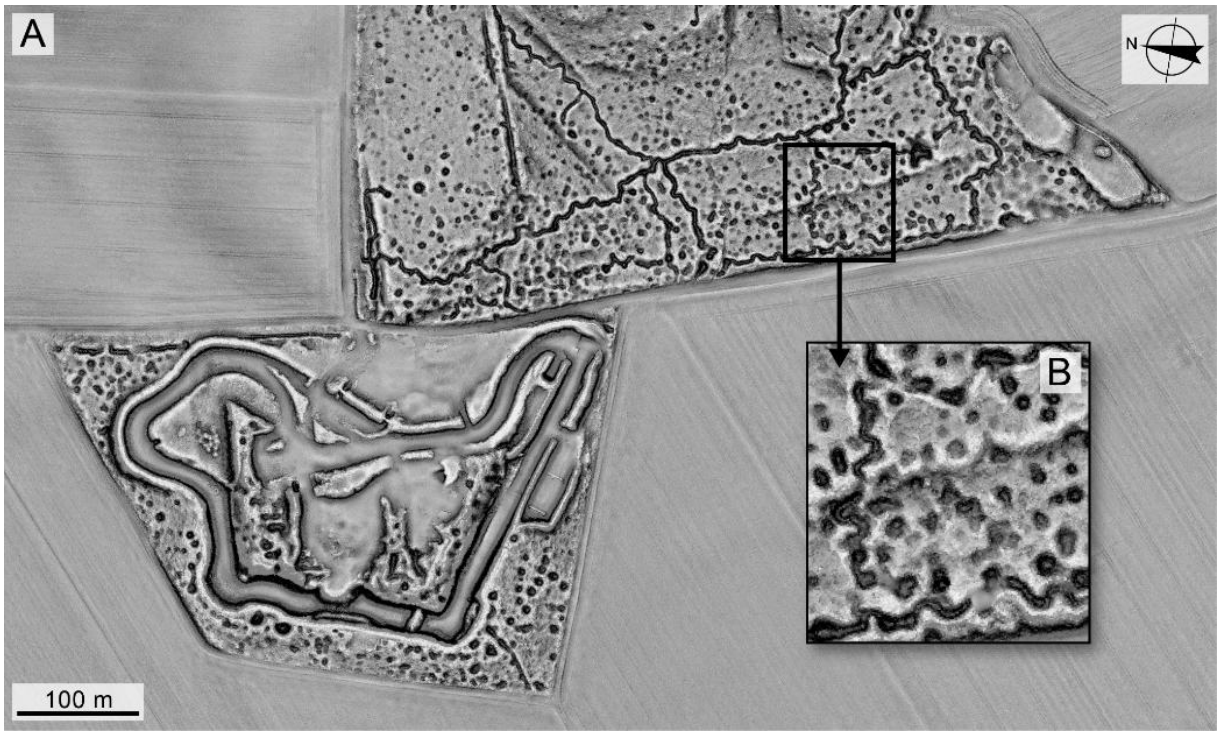


Figure 5.85 : Exemple de secteur ayant subi une « bombturbation » (MNT LIDAR HD 2023 traité visuellement, pente + LRM en transparence). A : Secteur de la batterie de Loivre (c) à l'ouest de la butte de Brimont ; B : Agrandissement sur un secteur affecté par de nombreux tirs d'obus.

5.3.3. Organisation spatiale des polémoformes

Les moyennes calculées à l'échelle de chaque secteur individualisé masquent de fortes disparités spatiales, ces dernières étant directement liées au contexte géomorphologique et aux impératifs militaires. L'organisation spatiale des polémoformes est donc examinée en fonction des principaux types de sites rencontrés au sein de la ceinture fortifiée de Reims. L'analyse porte d'abord sur la cuesta d'Île-de-France au droit du Massif de Saint-Thierry, où le revers de côte du Lutétien correspond à un interfluve étroit de largeur kilométrique (fig. 5.87A-C). Elle concerne ensuite les buttes-témoins de Brimont et de Berru qui jalonnent l'entonnoir de percée cataclinale (fig. 5.88, 5.89A-C), et enfin les sites d'avant-buttes développés sur la craie (fig. 5.90A-E). La relation spatiale et morphologique mutuelle entre les polémoformes Séré de Rivières et de la Première Guerre mondiale n'est ici que peu évoquée afin d'être envisagée en discussion dans une partie dédiée (*cf.* partie 6.1.2).

5.3.3.1. Cuesta et revers de côte du Massif de Saint-Thierry

Dans le Massif de Saint-Thierry (fig. 5.87A-C), les tranchées ne sont généralement pas implantées sur les points culminants des interfluves occupés par les forts, mais se concentrent principalement sur les crêtes de tir correspondant à la partie sommitale de la corniche des calcaires grossiers du Lutétien. Elles sont majoritairement creusées sur le front de côte, en amont pendage, face à l'ennemi, afin d'assurer des conditions favorables de tirs fichants vers le glacis situé en contrebas. À l'inverse, les versants en aval pendage, orientés vers l'ouest et tournés vers l'arrière-front, sont logiquement dépourvus de tranchées.

Cette position en surplomb sur le front de cuesta garantit également de bonnes conditions d'observation sur le dispositif ennemi. Les cuves en forme d'amphithéâtre, comme celles situées au nord du fort de Saint-Thierry (cuve d'Hermonville) ou à l'est du réduit de Chenay, présentent une organisation défensive particulièrement efficace, permettant la mise en œuvre de tirs croisés sur l'assaillant. Ce type de disposition spatiale des tranchées se retrouve dans des contextes géomorphologiques comparables, notamment au Chemin des Dames.

Les fossés perpendiculaires à la ligne de front, interprétés comme des boyaux de liaison reliant la position de crête aux secteurs en contrebas, entaillent le front de la cuesta. Plus à l'ouest, ces boyaux assurent parfois la connexion avec des bouches de cavage de creutes du Soissonnais, qui s'égrènent le long du front de taille et dominent une ligne de tranchée implantée en position de crête de tir (fig. 5.76B-C). Dans ce secteur, les forts ne jouent pas le rôle de centres de résistance individualisés, mais s'intègrent à une organisation linéaire du réseau de tranchées.

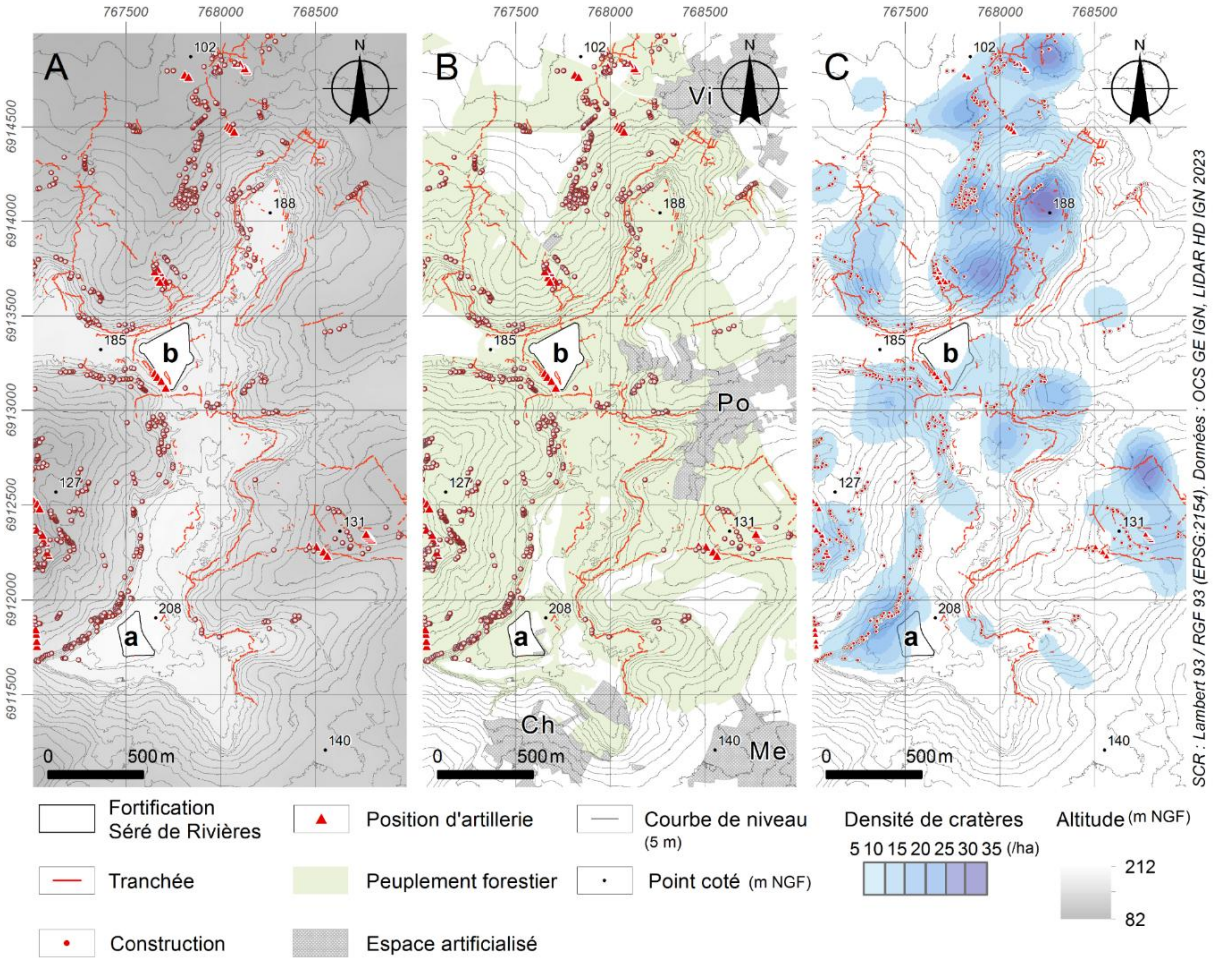


Figure 5.87 : Inventaire LiDAR des polémoformes de la Première Guerre mondiale dans le secteur du Massif de Saint-Thierry. A : Hypsométrie ; B : Couverture forestière ; C : Densité de cratères d'obus. a : Réduit de Chenay ; b : Fort de Saint-Thierry ; Ch : Chenay ; Me : Merfy ; Po : Pouillon ; Vi : Villers-Franqueux.

L'organisation spatiale du dispositif défensif du Massif de Saint-Thierry, notamment conservé sous forêt, répond ainsi à des logiques militaires classiques (tir, observation, abri, artillerie), fortement conditionnées par la structure géomorphologique. De nombreux emplacements d'artillerie sont localisés dans les dépressions, au cœur des cuves, afin de bénéficier d'un masque visuel vis-à-vis de l'ennemi. Ces positions sont fréquemment implantées sur des versants orientés au sud-ouest, en arrière des reliefs, permettant la mise en œuvre de tirs courbes. De très nombreuses structures s'échelonnent également sur le flanc occidental du plateau de Saint-Thierry, adossées à la corniche du Lutétien en aval pendage. Elles correspondent à des abris à munitions, à des abris pour les servants de pièces d'artillerie ou à des postes de commandement, théoriquement protégés des tirs directs et difficilement atteignables par les tirs d'obus (fig. 5.75B).

La carte des densités de cratères d'obus montre une très forte hétérogénéité spatiale dans le Massif de Saint-Thierry avec des valeurs qui s'échelonnent entre 0 et 35 impacts/ha (fig. 5.87C). Ces *maxima* restent cependant faibles en comparaison d'autres secteurs du

front occidental, notamment à Verdun où les densités dépassent 190 impacts/ha (De Matos-Machado et al., 2019), à Berry-au-Bac avec 54 impacts/ha (Taborelli et al., 2017a), et à Servon en Argonne avec 51 impacts/ha (Brénot et al., 2017). Cette faible intensité de cratères d'obus s'explique par la position du Massif de Saint-Thierry en quatrième position de défense, en retrait de la ligne de front. Le secteur est davantage marqué par des dispositifs d'observation et d'artillerie lourde à grande portée (ALGP), et bénéficie en outre de nombreux masques de relief.

Les secteurs les plus fortement touchés par la bombturbation correspondent logiquement aux versants exposés à l'est, notamment autour de la cote 188, ainsi qu'aux principales structures militaires, traduisant une bonne connaissance du dispositif français par les forces allemandes. Plus surprenante est la densité notable de cratères observée sur certains versants non exposés, en particulier à l'ouest du réduit de Chenay. Cette distribution pourrait témoigner d'épisodes de guerre de mouvement, notamment lors de l'offensive allemande du printemps 1918 (annexe 50).

5.3.3.2. Buttes-témoins de Brimont et Berru

Sur les buttes-témoins de Brimont et de Nogent-L'Abbesse, le dispositif structural et l'organisation des réseaux de défense diffèrent sensiblement de ceux observés dans le Massif de Saint-Thierry (fig. 5.88, 5.89). Ces reliefs ne présentent pas de corniche de roche dure associée au Lutétien à leur sommet. Ils sont principalement sculptés dans la craie du Crétacé, surmontée de lambeaux discontinus de sables et d'argiles tertiaires. Par ailleurs, ces buttes sont intégrées au réseau de défense allemand, à la différence du Massif de Saint-Thierry contrôlé par les forces françaises. Elles s'inscrivent dans les 1re et 2e positions de défense, alors que le fort de Saint-Thierry et le réduit de Chenay relèvent des 3e et 4e positions.

Cela explique en partie les densités élevées de tranchées et de boyaux, surtout dans le secteur de Brimont (3729 m/km²), qui se retrouve en première position après l'offensive Nivelle de 1917 (fig. 5.88). Pour ce site, la structure du réseau de défense est clairement cellulaire autour de la butte avec en son centre, le fort de Brimont (Devos et al. 2019b), avec trois à cinq lignes de tranchées ceinturant le relief. L'empreinte de la première position allemande de 1917 est nettement lisible, avec deux à trois lignes de tranchées au sud-ouest du site, arrimées à la batterie de Loivre. Le flanc septentrional de la butte montre également trois à quatre lignes de tranchées, étagées entre 100 et 155 m d'altitude, souvent calées sur d'anciens rideaux de culture (*cf.* partie 5.4.2).

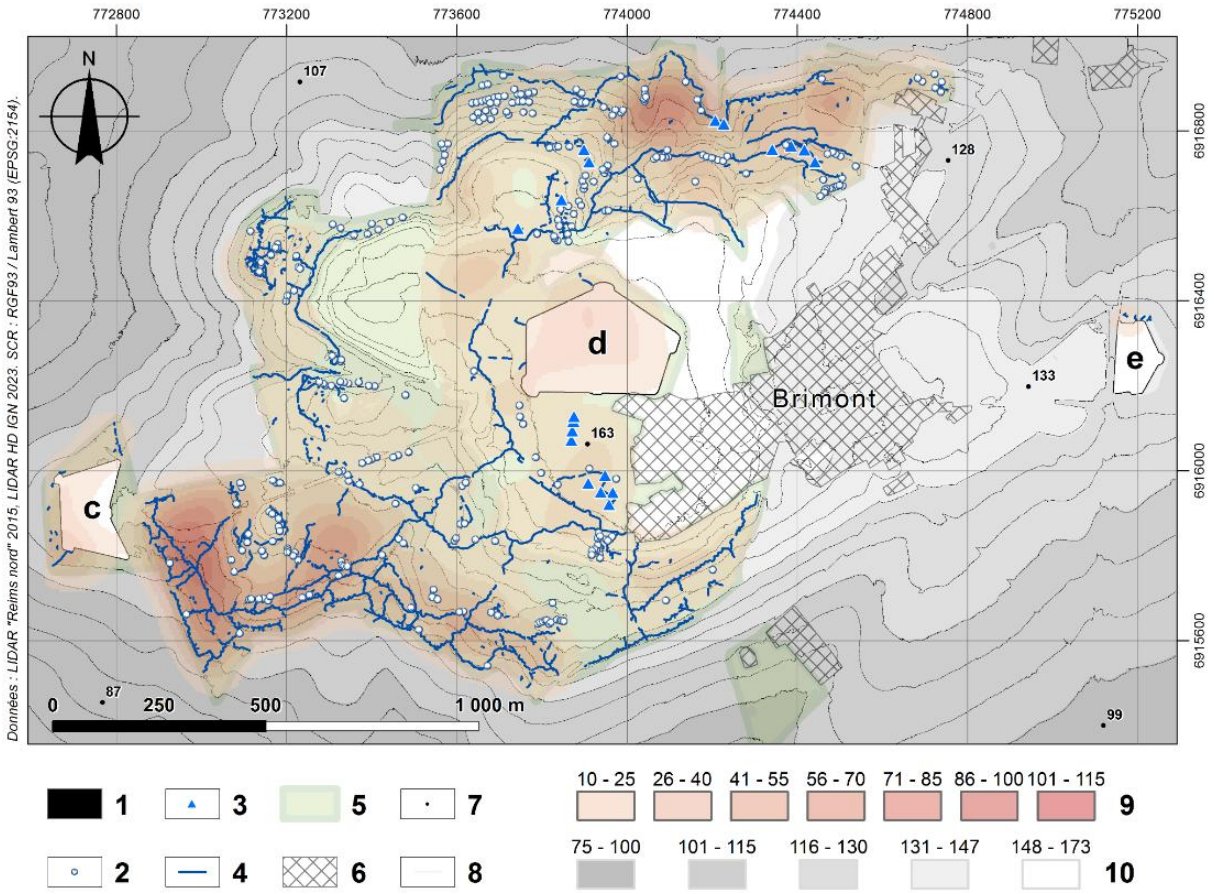


Figure 5.88 : Inventaire LiDAR des polémoformes de la Première Guerre mondiale dans le secteur de la butte de Brimont. c : Batterie de Loivre ; d : Fort de Brimont : e : Batterie du Cran de Brimont. 1 : Fortifications « Séré de Rivières » ; 2 : Structures allemandes ; 3. Positions d'artillerie ; 4 : Tranchées et boyaux allemands ; 5 : Surface forestière actuelle ; 6 : Espace bâti ; 7 : Points cotés (en m NGF) ; 8 : Courbes de niveau (5 m) ; 9 : Densité de cratères d'obus (cratères/ha) ; 10 : Altitude (en m NGF).

Sur les promontoires de sables thanétiens en limite d'affleurement, le LiDAR révèle un réseau dendritique de boyaux desservant de petits postes avancés et des observatoires. De nombreuses structures, interprétées comme des emplacements de mitrailleuses, de mortiers ou des abris souterrains, sont creusées dans les sables grésifiés du Thanétien, qui offrent de bonnes conditions au creusement (fig. 5.73A-B, 5.74A-E).

Les tirs d'obus jouent ici un rôle morphogène marqué. Les secteurs les plus fortement touchés par la bombturbation se concentrent sur les premières lignes de défense au sud-ouest et au nord de la butte, en lien probable avec l'offensive Nivelle d'avril 1917. Les densités de cratères dépassent localement 100 impacts/ha (fig. 5.88).

La butte de Nogent-L'Abbesse est également intégrée au système défensif allemand, en seconde position, selon une organisation cellulaire comparable (fig. 5.89A-C). L'ensemble de la butte est fortifié par un réseau dense et complexe, totalisant plus de 42 km de fossés, structurés en trois à quatre lignes de tranchées conservées sous forêt (tab. 5.23). Une fois de plus, le relief semble grandement conditionner cette organisation. Les tranchées sont

creusées sur le flanc méridional de la butte, bénéficiant de crêtes de tirs fichants vers l'ennemi et sur les lignes de crêtes. Le croisement de nombreux boyaux favorise la formation de centres de résistance ou de réduits, disposés sur les saillants des glacis qui séparent des vallons peu ou non fortifiés. Cette organisation, propice aux tirs croisés, témoigne d'une utilisation fine du terrain.

Les structures militaires ponctuelles révélées par le LiDAR sont très nombreuses, avec plus de 1 000 entités recensées (tab. 5.25), réparties à la fois sur les versants exposés et sur les versants en arrière. Elles comprennent, au sud, des postes avancés, des postes d'observation et des emplacements de mitrailleuses, tandis que les abris sont plus fréquents au nord. Les positions d'artillerie sont systématiquement installées en arrière, à l'abri des vues directes grâce au masque de relief (fig. 5.75A). Elles sont manifestement approvisionnées par une voie ferrée étroite desservant le flanc nord de la butte (fig. 5.68A).

La densité des cratères, marquée par une forte variabilité des calibres, est hétérogène, avec des valeurs comprises entre 10 et 140 cratères/ha. Les secteurs les plus affectés correspondent aux axes logistiques, aux versants exposés aux forces françaises et aux nœuds du réseau de défense.

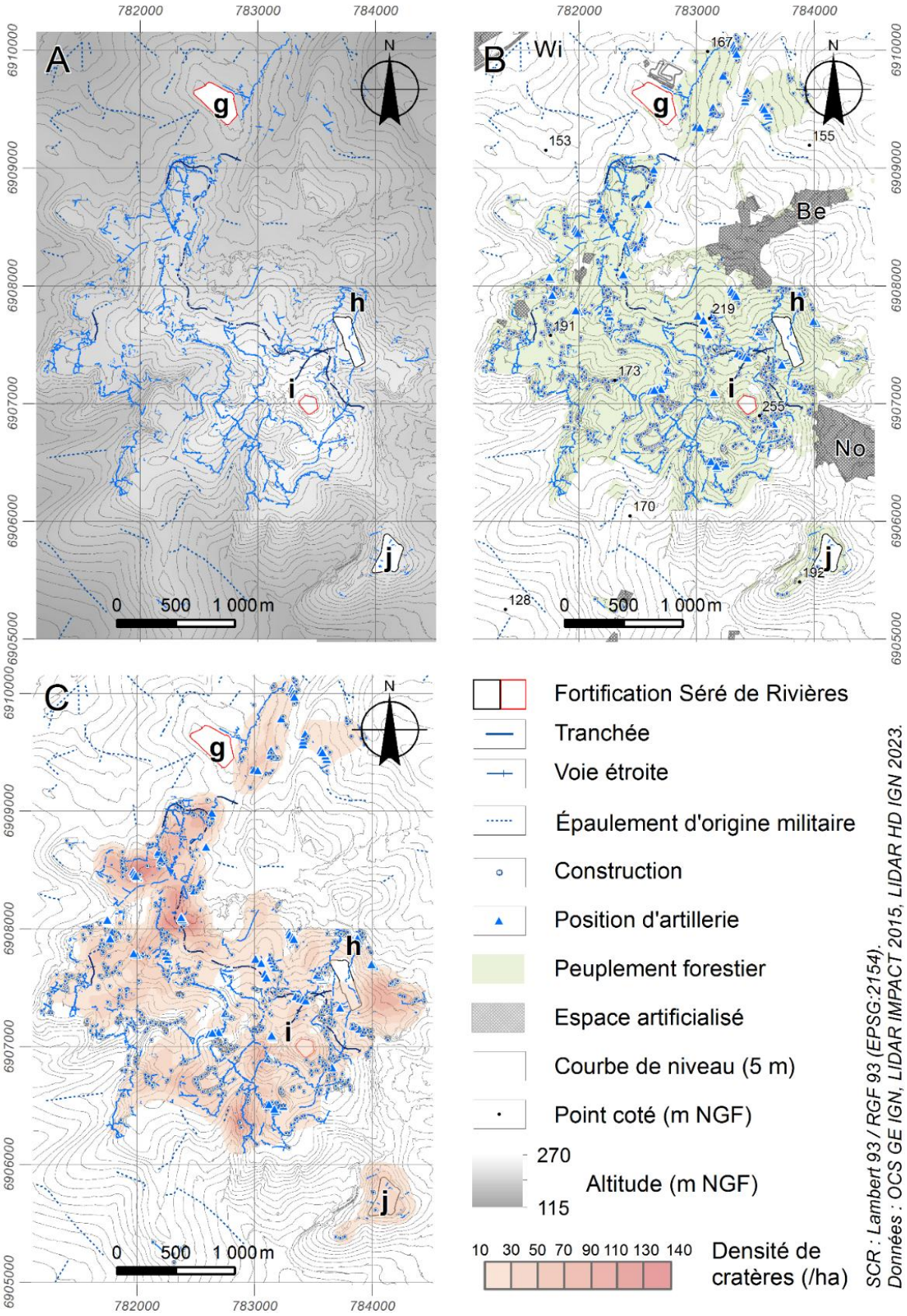


Figure 5.89 : Inventaire LiDAR des polémoformes de la Première Guerre mondiale dans le secteur de la butte de Berru. A : Hypsométrie ; B : Couverture forestière ; C : Densité de cratères d'obus. g : Fort de Witry-lès-Reims ; h : Batterie de Berru ; i : Vigie de Berru ; j : Fort de Nogent-l'Abbesse.

5.3.3.3. Avant-buttes de craie

Les avant-buttes de craie supportant les forts de la Pompelle, de Fresne et de Montbré correspondent à des croupes crayeuses intégrées à des positions de défense contrastée (fig. 3.52, 5.90A-E). Seul le fort de la Pompelle repris par les Français en 1914 (Neuville, 1999) se situe en première position alors que le fort de Montbré sert de centre de résistance de la troisième position française tout comme celui de Fresne, mais du côté allemand.

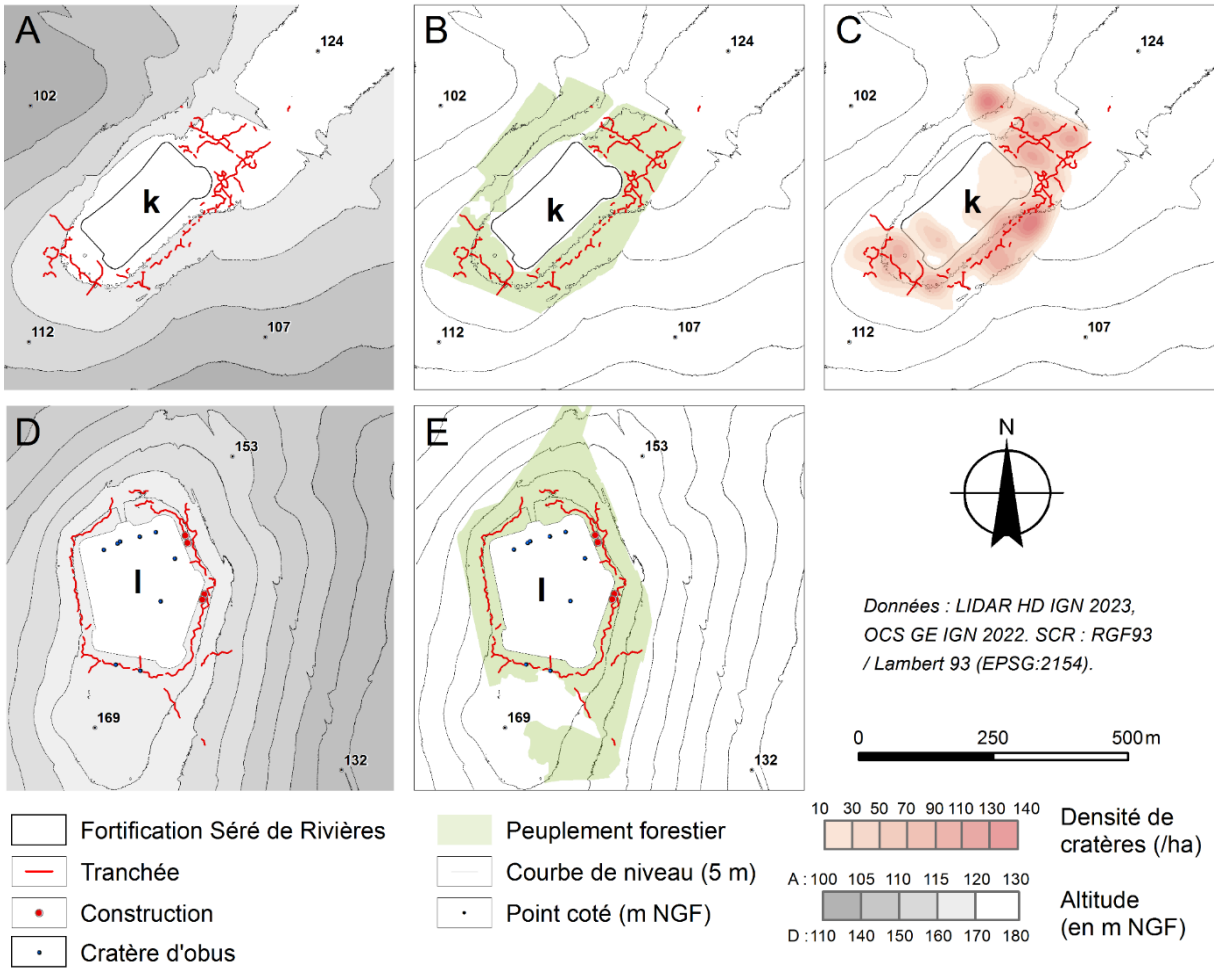


Figure 5.90 : Inventaire global des formes cartographiées des sites des forts de la Pompelle et de Montbré. A : Hypsométrie du site du fort de la Pompelle ; B : Couverture forestière du site du fort de la Pompelle ; C : Densité de cratères d'obus du site du fort de la Pompelle ; D : Hypsométrie du site du fort de Montbré ; E : Couverture forestière du site du fort de Montbré. k : Fort de la Pompelle ; l : Fort de Montbré.

Le fort de la Pompelle illustre bien cette situation. Intégré à la première position française, il constitue un verrou contrôlant la route D944 (ancienne RN44) vers Reims et la vallée de la Vesle. Les fossés bordant cette route sont aménagés pour former la première ligne de défense, à la fois française au sud et allemande au nord, définissant l'un des *no man's land* les plus étroits du secteur, limité à l'emprise routière. Les boyaux de communication reliant le fort à la route sont encore lisibles sur les données LiDAR. En raison de ce rôle stratégique majeur, la densité de cratères d'obus y est particulièrement élevée, avec des secteurs

dépassant 130 cratères/ha. L'héritage morphologique de la Grande Guerre reste cependant cantonné à un îlot forestier isolé, les polémoformes ayant été largement nivelées dans les zones de grandes cultures de la Champagne crayeuse. Le cratère de mine de 1914, situé au nord de la route, a disparu, tout comme la tranchée occidentale du réduit de 1918. Il en va de même pour la gorge du fort, dont les morphologies de guerre ont été effacées par les aménagements liés à la reconversion touristique et muséographique.

Le fort de Montbré, situé en troisième position française, occupe le sommet du Mont Thibé, une croupe crayeuse aux versants à pente douce correspondant à un ultime reliquat de glacis raccordés à la Montagne de Reims, entaillés par un réseau de vallons périglaciaires (fig. 3.3, 3.5). L'empreinte morphologique du réseau défensif y traduit une organisation cellulaire, avec une ligne de tranchée creusée dans le glacis à une dizaine de mètres du fossé, matérialisant un réduit de défense bien individualisé. Le site ne compte que six entonnoirs d'obus, concentrés autour du fort. Là encore, les polémoformes ne subsistent que dans l'îlot forestier, encadré par les vignes à l'est et les grandes cultures à l'ouest.

À l'échelle de l'ensemble de la ceinture fortifiée de Reims, l'organisation spatiale des polémoformes de la Grande Guerre révélées par le LiDAR apparaît donc principalement conditionnée par le contexte géomorphologique, exploité de manière systématique par les militaires. La diversité des sites, au sein de l'entonnoir de percée cataclinale à travers le front de la cuesta d'Île-de-France, offre de multiples configurations favorables à l'observation, au tir, à l'abri et à la mise en place de réduits défensifs. Ces conditions déterminent une efficacité accrue des dispositifs d'artillerie, ce qui se traduit par un élargissement et une complexification des réseaux de défense.

Le rôle des forts du système Séré de Rivières apparaît variable selon leur position dans le dispositif, limité à l'échelle locale ou territoriale, mais clairement renforcé dans les secteurs proches de la ligne de front. L'empreinte morphologique de la guerre reste toutefois largement dépendante du forçage humain postérieur. Les polémoformes sont aujourd'hui presque exclusivement conservées en contexte forestier et ont été largement nivelées dans les espaces agricoles. Leur analyse conjointe plus poussée dans la partie 6.1.2 doit permettre de caractériser plus précisément leur relation spatiale et morphologique mutuelle.

Conclusion de la partie 5.3

En définitive, l'inventaire LiDAR des polémoformes de la Première Guerre mondiale dans le secteur rémois révèle un paysage de guerre à la fois structuré par les logiques militaires et les paramètres géomorphologiques, et morcelé par le forçage humain postérieur, articulant de vastes réseaux linéaires (tranchées, boyaux, voies étroites, épaulements) et des morphologies plus ponctuelles (structures, positions d'artillerie, cratères d'obus). Ce portrait spatial et morphologique, en continuité avec les travaux antérieurs (Devos et al., 2015 ; De Matos-Machado, 2018 ; Gheyle et al., 2018 ; Taborelli et al., 2018), permet d'esquisser une typologie synthétique propre aux secteurs étudiés, inspirée de Taborelli et al. (2017b ; fig. 5.91).

Les polémoformes recensées totalisent plus de 100 km de linéaire (dont 85 km de tranchées) et plus de 26 000 entités ponctuelles (dont 24 000 cratères d'obus). Leur distribution présente des régularités marquées : une conservation élevée sous forêt, un effacement net en milieu agricole, une concentration accrue autour des positions exposées et un renforcement du signal en direction de la ligne de front selon un gradient polémologique linéaire (De Matos-Machado, 2018). Ce schéma général est nuancé par la présence d'organisations cellulaires locales, notamment autour de la butte de Brimont, et par l'usage pragmatique des paramètres géomorphologiques dans un contexte façonné par les contrastes hérités des sédimentations paléogènes.

Finalement, ces résultats ouvrent deux questions majeures : comment la guerre a-t-elle remodelé les polémoformes Séré de Rivières, et dans quelle mesure la position des forts a-t-elle influencé l'organisation multiscalaire des réseaux de tranchées et des structures militaires associées et influence-t-elle encore aujourd'hui ces morphologies ? Avant d'y répondre, la partie suivante s'attache à présenter les autres formes révélées par le LiDAR, également constitutives de la composante anthropique du palimpseste topographique.

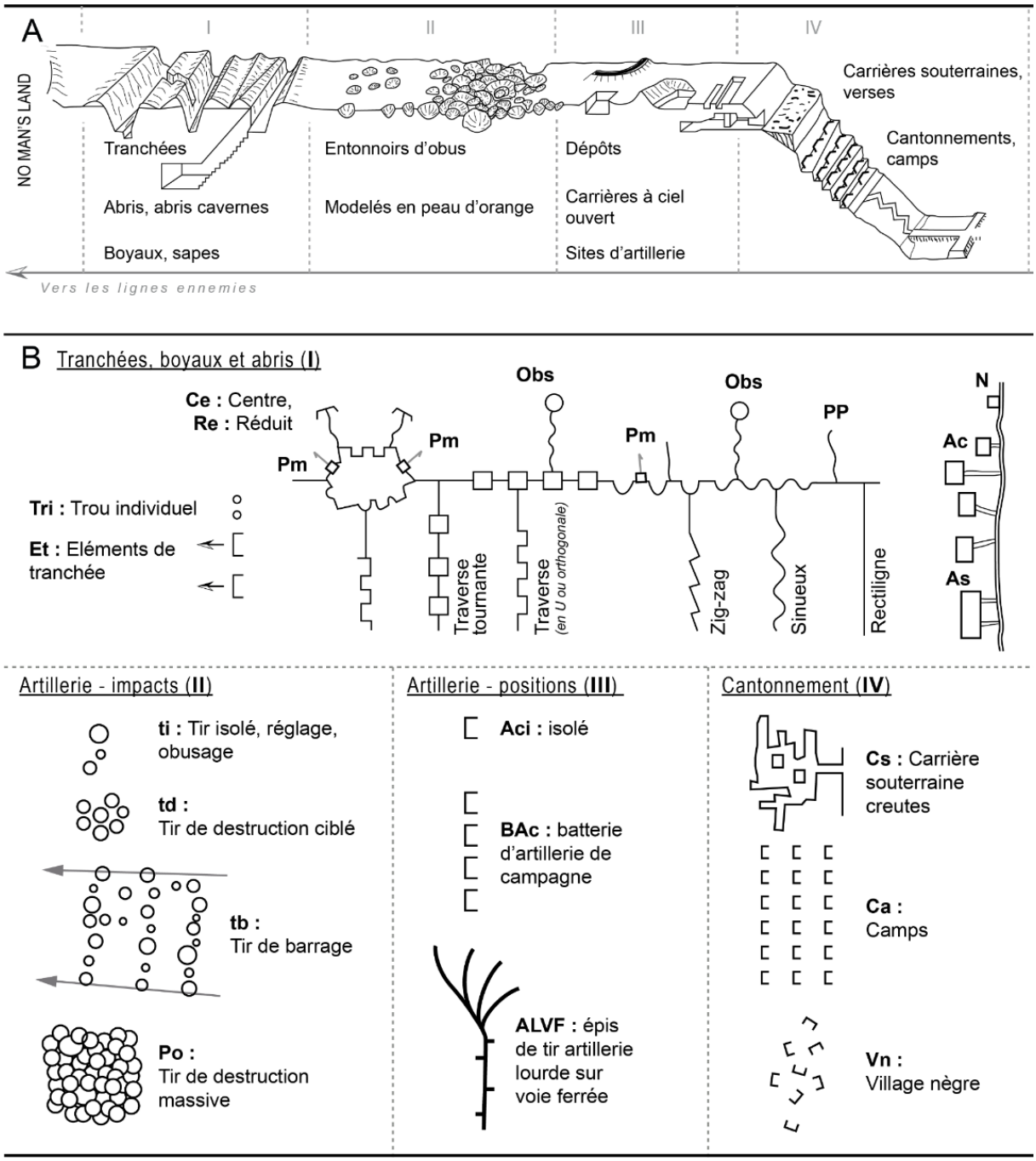


Figure 5.91 : Typologie des polémoformes de la Grande Guerre observées sur le secteur d'étude (d'après Taborelli et al., 2017b).

5.4. Carrières et autres formes archéologiques

Cette partie traite des formes inventoriées constituant l'environnement archéologique qui ne sont pas affiliées à la mise en défense ni à la guerre. Ces morphologies sont analysées, comme précédemment, tant selon une perspective morphologique que spatiale. Elles correspondent en premier lieu aux carrières (5.4.1), vis-à-vis desquelles un intérêt particulier est porté compte tenu de l'utilisation potentielle de géomatériaux locaux dans la construction des forts de Reims. Dans un second temps, les autres formes, notamment cartographiées sous forme de polylignes, sont présentées (5.4.2).

5.4.1. Carrières

Les carrières à ciel ouvert constituent les formes les plus imposantes du Pays rémois, avec un cumul surfacique total de plus de 150 ha très majoritairement situé sous forêt et des sites atteignant individuellement jusqu'à 70 ha d'un seul tenant dans le Massif de Saint-Thierry (tab. 5.1A ; fig. 5.1 ; tab. 5.26). De même que les fortifications Séré de Rivières, la complexité morphologique élevée des plus grandes structures, induite par un emboîtement de forme, nécessite une approche bi-scalaire : à l'échelle de la forme globale, correspondant au site d'extraction dans son ensemble, et à l'échelle des structures internes, c'est-à-dire des morphologies inhérentes aux modes d'exploitation.

Leur étude passe notamment par leur caractérisation morphologique, morphométrique et de leur organisation spatiale, et lorsque c'est possible, par la détermination du type de géomatériaux concerné par l'activité extractive et d'une époque d'activité. Cela doit notamment permettre de documenter l'emploi de géomatériaux locaux dans la construction des forts de Reims et donc de renseigner la création de polémoformes logistiques selon la typologie de Hesse (2014 ; *cf.* partie 6.1.1.4).

Un portrait global est présenté dans un premier temps, à partir des deux grands types morphologiques identifiés dans le protocole de digitalisation que sont les carrières à front de taille et les carrières à fosses d'extraction (fig. 4.39). Dans un second temps, les caractéristiques des carrières du Massif de Saint-Thierry, de la butte de Brimont et de la butte de Berru sont traitées (tab. 5.26), dont la disponibilité géologique varie notamment du fait de la variabilité latérale de faciès et de leur puissance effective en Pays rémois (fig. 3.4, 3.5). Les secteurs sur avant-butte de craie ne sont ici pas évoqués car aucun site d'extraction n'a été détecté.

	Carrière - surface (m²) totale	moyenne	min	max	par km²	nb.	nb. / km²
MdBr	23 054	961	74	8 927	4 610	24	4,8
MdBe	928 692	7 937	80	159 913	48 878	117	6,2
MdST	616 230	16 441	178	686 417	77 028	42	5,3
Total	1 567 976	/	/	/	/	168	/

Tableau 5.26 : Statistiques relatives aux sites d'extraction. MdBe : Mont de Berru ; MdBr : Mont de Brimont ; MdST : Massif de Saint-Thierry.

5.4.1.1. Morphologie et morphométrie

Dans le Pays rémois, les carrières à front de taille et les carrières à fosses d'extraction constituent les deux principales catégories morphologiques identifiées (fig. 5.92A-E, 5.93A-B). Deux sites d'extraction souterraine, recensés dans la BD cavités du BRGM, n'ont pas été intégrés à l'étude. Aucun autre site d'extraction souterraine n'a été identifié ni dans les sources archivistiques, ni lors des prospections de terrain.

La carrière à front de taille constitue le modèle dominant. Elle correspond à une exploitation menée à flanc de coteau, dans un versant ou en rebord de plateau (fig. 5.92A-E). Elle se caractérise par un front vertical ou subvertical, associé à une progression horizontale de l'exploitation. Sur les données LiDAR, la morphologie se traduit par une paroi dont la pente varie selon la lithologie et l'ancienneté du site. Un replat se développe généralement au pied du front, parfois accompagné des pistes de roulage ou d'accès et de haldes de déblais (fig. 5.92A-C). D'autres marqueurs morphologiques, plus difficilement caractérisables, peuvent correspondre à des plateformes de stockage ou à des traces d'autres structures (baraquements, treuils à manège, *etc.*).

Ces carrières peuvent être simples, impliquant alors un front de taille unique formant un rentrant dans le relief (fig. 5.92A-C). Elles peuvent également se complexifier, tant horizontalement avec un front s'organisant en plusieurs lobes (carrière polylobée ; fig. 5.92D), que verticalement lorsque la progression est effectuée par l'intermédiaire de terrasses (fig. 5.92C), ou qu'un surcreusement est effectué au sein du replat (fig. 5.92E).

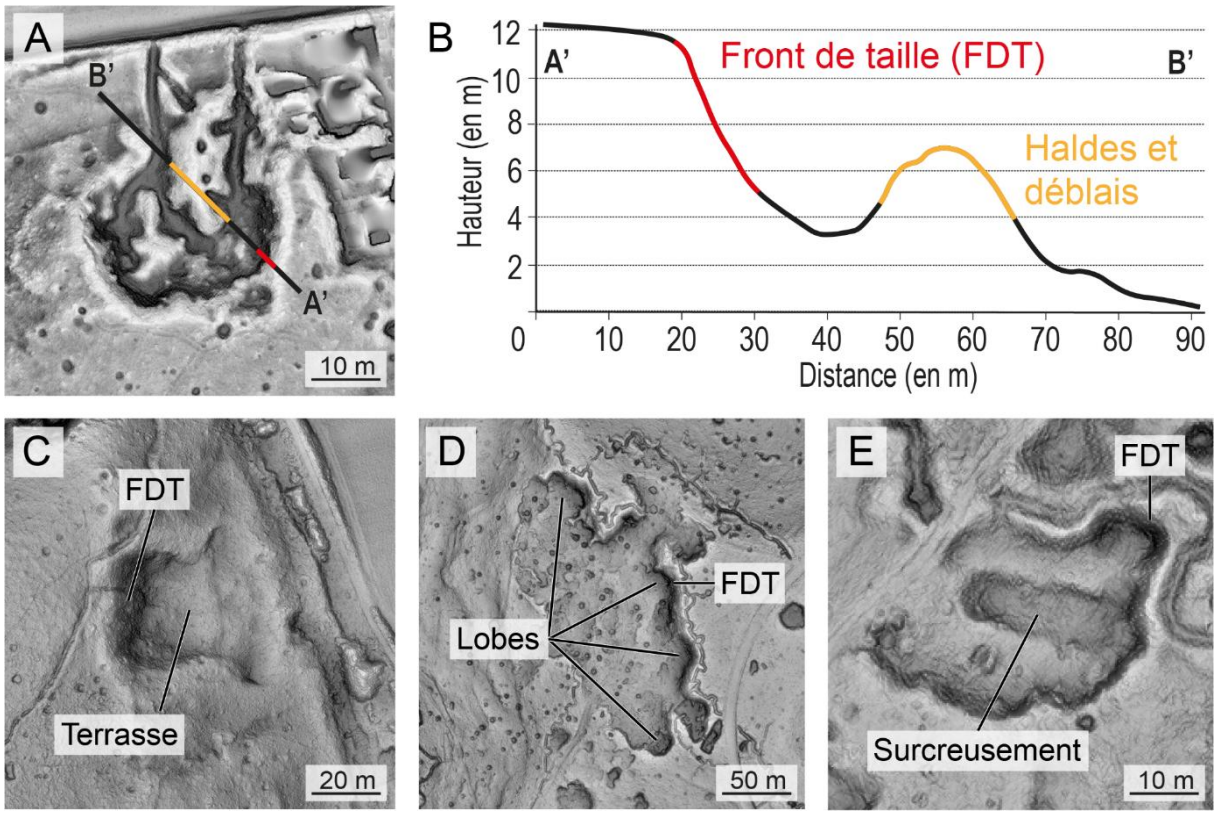


Figure 5.92 : Types de carrières à front de taille (FDT ; les vignettes sont orientées nord). A : Carrière à front de taille simple ; B : Profil topographique associé ; C : Carrière à front de taille simple avec terrasse ; D : Carrière à front de taille polylobée ; E : Carrière à front de taille avec surcreusement.

Les carrières à fosses d'extraction, également à ciel ouvert, présentent des morphologies plus diffuses. Elles se manifestent sous forme de petites dépressions coalescentes de 5 à 10 m de diamètre, issues d'une exploitation progressant en profondeur, souvent matérialisée par des cuvettes élargies aux bords doux, l'absence de front de taille étant caractéristique. En négatif des dépressions, l'accumulation de déblais extraits sous forme de haldes génère des formes en élévation (fig. 5.93A-B).

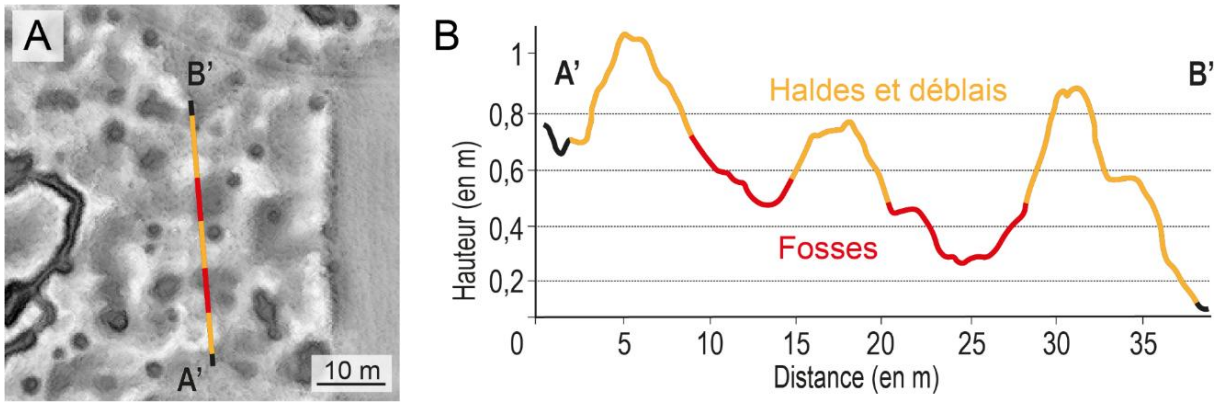


Figure 5.93 : Carrière à fosses d'extraction sur le Mont de Berru. A : MNT LIDAR HD 2023 traité visuellement (pente + LRM en transparence ; orientation nord) ; B : Coupe topographique associée.

Trois autres types de morphologie, plus rares, complètent cet inventaire (fig. 5.94A-C) :

- des carrières en excavation, relevant d'une logique verticale, mais concentrées en une seule dépression plus marquée que les fosses d'extraction ;

- des extractions par décapage, de faible profondeur (< 2 m), se présentant comme des formes de dépressions polygonales à fond plat ;

- une morphologie composite plus hypothétique, constituée d'une dépression quadrangulaire contenant une dépression circulaire associée à une tranchée longiligne, pouvant évoquer une extraction en puits, à l'image de celle identifiée en Montagne de Reims (*cf. infra* ; Guérin, 1970).

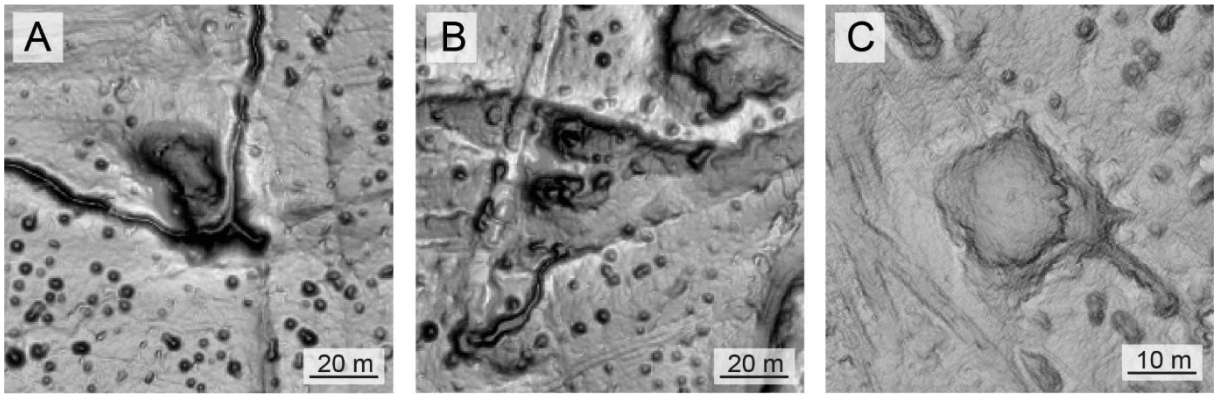


Figure 5.94 : Autres types de carrières situées sur le Mont de Berru constituant des exceptions morphologiques (MNT LIDAR HD traité visuellement, pente + LRM en transparence, 2023, IGN ; orientation nord). A : Carrière en excavation ; B : Extraction par décapage ; C : Extraction en puits potentielle.

Les surfaces totales occupées par les carrières varient globalement en fonction de la superficie des secteurs étudiés, pour un nombre de sites comparable d'un secteur à l'autre, de l'ordre de 5 à 6 sites par km². En revanche, la surface moyenne des carrières diffère fortement selon les contextes, avec 0,1 ha sur la butte de Brimont (5 km²), 0,6 ha sur la butte de Berru (19 km²) et 1,8 ha sur le Massif de Saint-Thierry (8 km² ; tab. 5.26).

Les sections suivantes détaillent ces contrastes en intégrant la nature des géomatériaux exploités et la temporalité des phases d'extraction. L'analyse débute par la butte de Berru, pour laquelle l'investigation a été la plus approfondie.

5.4.1.2. Butte-témoin de Berru

Le Mont de Berru correspond à une butte-témoin de formations argilo-sableuses paléogènes, armée par la craie campanienne et coiffée de niveaux marneux éocènes (Lutétien-Bartonien) et d'épandages d'Argiles à meulière (*cf.* partie 3.2 ; fig. 5.95). C'est le secteur le plus riche en carrières, avec 117 sites couvrant 93 ha, pour des superficies allant

de 80 m² à près de 16 ha. La nature des géomatériaux a pu être déterminée pour 70 sites en croisant données archivistiques, géologiques et caractéristiques topographiques. Quatre profils extractifs se distinguent en fonction de la morphologie et du type de géomatériaux exploité (fig. 5.95, 5.96).

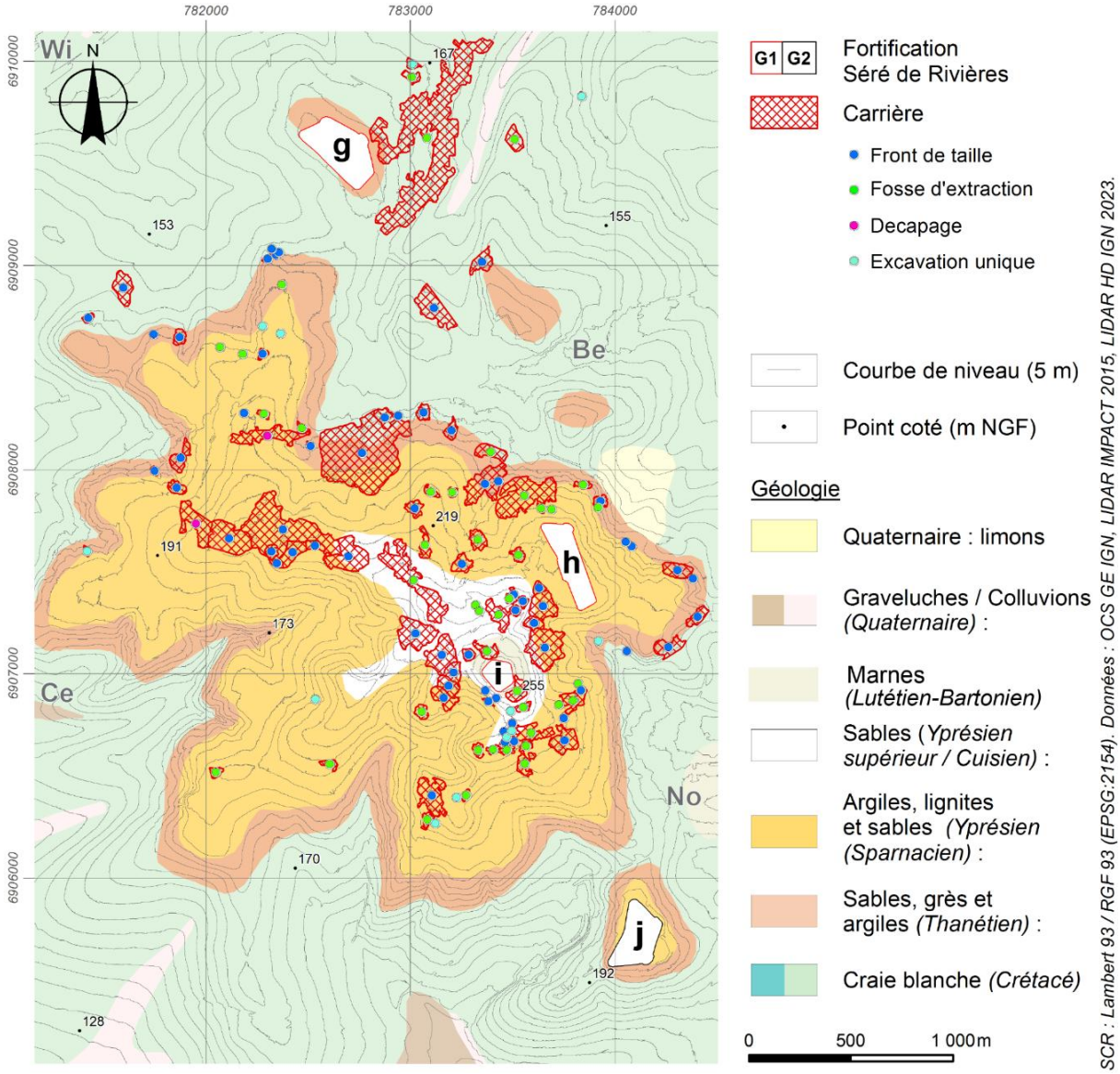


Figure 5.95 : Inventaire des carrières du Mont de Berru selon le type de morphologie. g : Fort de Witry-lès-Reims ; h : Batterie de Berru ; i : Vigie de Berru ; j : Fort de Nogent-l'Abbesse. Be : Berru ; Ce : Cernay-lès-Reims ; No : Nogent-l'Abbesse ; Wi : Witry-lès-Reims.

Le premier concerne la pierre meulière, utilisée comme moellon de construction et pour l'empierrement dès l'Antiquité (Fronteau et al., 2022), exclusivement extraite sous forme de fosses coalescentes, peu profondes. L'altitude des sites (158-256 m) témoigne d'une mobilisation importante des Argiles à meulières sur des glacis d'épandages en périphérie des sommets. Le démantèlement des Argiles à meulière a en effet entraîné la formation d'épandages de cailloutis siliceux, meulière emballée dans une argile brun-rouge. Elle se situe sur les parties sommitales cénozoïques, où les exploitations couvrent de quelques

milliers de m² à 3-4 ha, ainsi que sur les glacis de raccordement à la vallée de la Vesle et de la Suippe (Laurain et al., 1981), tel que dans le bois de Witry, à l'est du fort de Witry-lès-Reims, où l'on observe le plus grand site d'extraction de près de 16 ha (fig. 5.97A-B).

Le deuxième type concerne les sables, exploités principalement entre 170 et 210 m dans les sables thanétiens, et plus marginalement vers 240 m dans les sables cuisiens (Yprésien supérieur). Les sables blancs, les plus purs, situés à la base des sables thanétiens, ont notamment servi à la verrerie (Laurain et al., 1981). Ils présentent également de nombreux usages en construction et travaux publics (mortiers, bétons, enduits, routes, remblais) ou en filtration (*e.g.*, source Rouby ; annexe 12A-B). Le mode d'exploitation dominant est le front de taille simple formant des morphologies en U caractéristiques (fig. 5.92A). Cette configuration se complexifie dans la grande sablière située à l'ouest de la vigie de Berru, où le front devient polylobé et où des volumes importants de déblais perturbent la lecture morphologique (fig. 5.98A-B).

Le troisième type d'exploitation concerne les lignites pyriteux des Argiles à lignites (Yprésien supérieur ou Sparnacien), extraites en front de taille selon les trois morphologies recensées et connues sous le nom de cendrières. Ces carrières soutiennent dès les XVIIIe-XIXe siècles une petite industrie locale par la production de cendres destinées à l'amendement agricole. Parallèlement, ces mêmes formations fournissent des matériaux argileux nécessaires au développement des industries briquetières et tuilières. C'est notamment au sein de cette formation que se trouve un potentiel puits d'extraction d'argile (fig. 5.94C), dont la description morphologique coïncide avec celle effectuée sur des sites similaires dans le bois des miniers en Montagne de Reims (Guérin, 1970). Cette hypothèse est par ailleurs appuyée par la présence à proximité du site de l'ancienne Tuilerie de Cernay réputée comme possédant un tel puits en 1870 (Aumonier et Eck, 1873). Il est également possible que cette dépression corresponde à une « mouillère », c'est-à-dire un plan d'eau utilisé pour imbiber l'argile avant de le travailler à la tuilerie.

Le dernier type correspond à l'extraction de terre, sous forme de terrière, notamment pour la réalisation de carreaux de terre ou adobes utilisés pour l'élévation du bâti. Ce type d'exploitation, qui concerne des matériaux non géologiques, demeure peu documenté dans la littérature. Le cadastre napoléonien indique pourtant que ces lieux d'extraction occupaient une place notable dans les communautés rurales de Champagne, notamment en périphérie des villages dont une majeure partie était construite en carreaux de terre (Aras-Gaudry, 2025 ; annexe 51). Une seule morphologie visible au LiDAR correspond à une terrière signalée au lieu-dit « La Fosse à l'Âne ». Toutefois, sans investigations complémentaires, rien ne garantit que ce site n'ait pas évolué par la suite en crayère, bien qu'aucune archive ne l'atteste (fig. 5.99A-C). Ce phénomène est documenté pour une terrière située 600 m au sud-ouest, au nord du lieu-dit « La Côte du Moulin » (commune de

Berru), où l'implantation ultérieure d'une sablière attestée par les plans directeurs a effacé la morphologie initiale (fig. 5.100A-C).

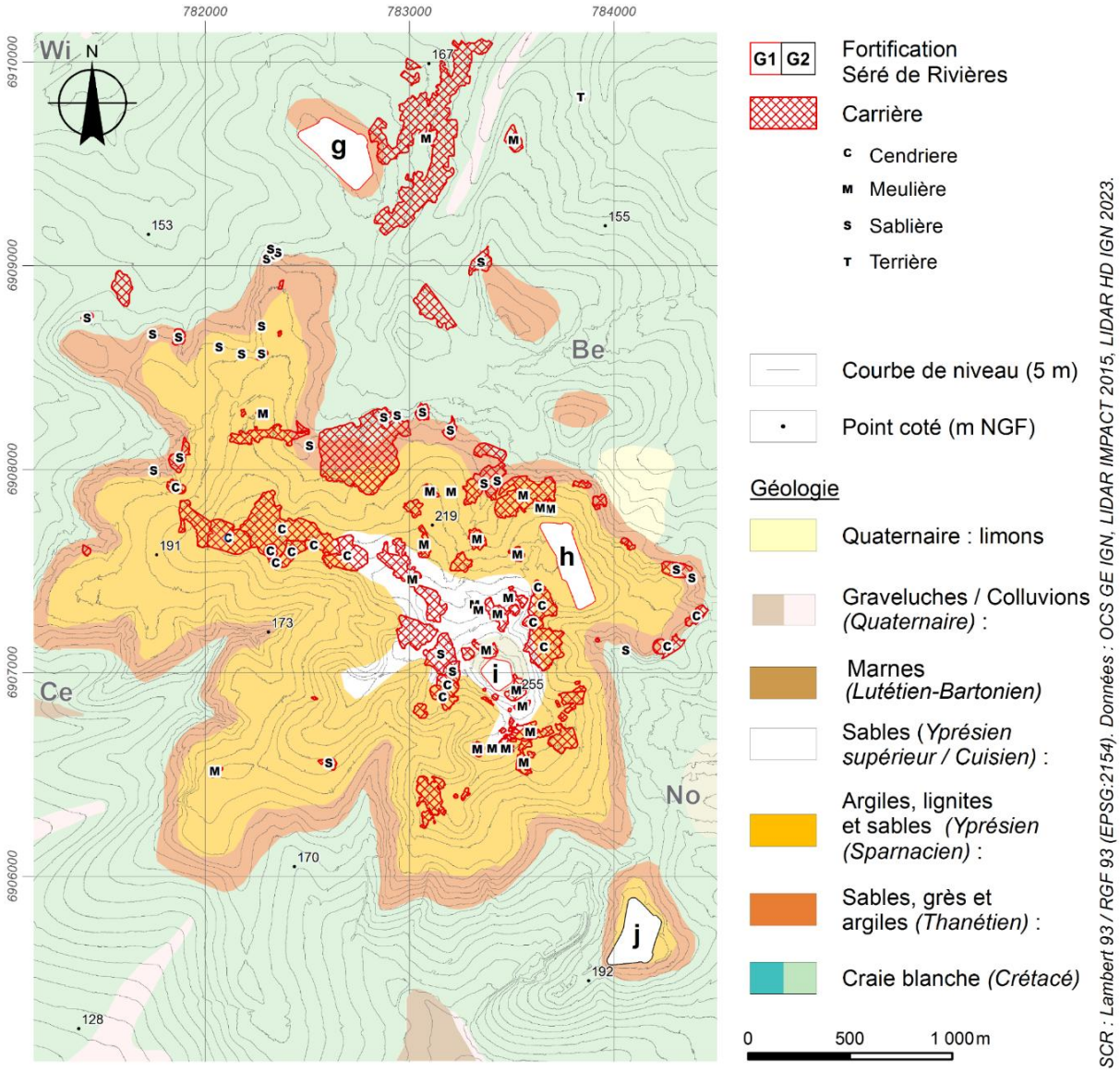


Figure 5.96 : Inventaire des carrières du Mont de Berru selon le type de géomatériaux exploité. g : Fort de Witry-lès-Reims ; h : Batterie de Berru ; i : Vigie de Berru ; j : Fort de Nogent-l'Abbesse. Be : Berru ; Ce : Cernay-lès-Reims ; No : Nogent-l'Abbesse ; Wi : Witry-lès-Reims.

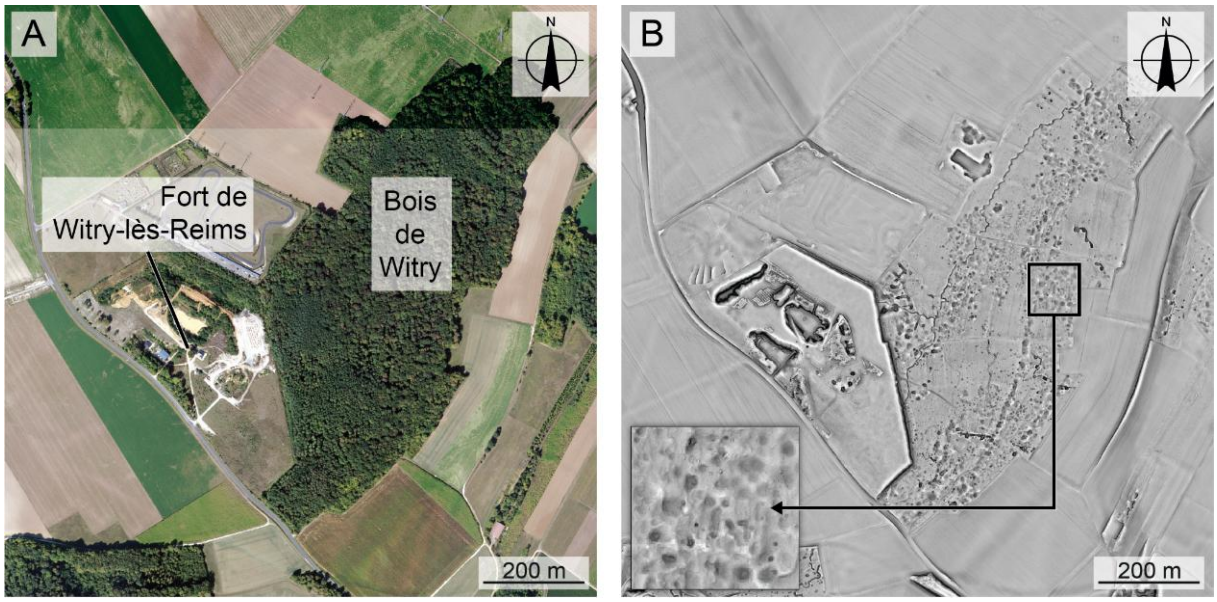


Figure 5.97 : Fosses d'extraction de meulière supposées dans le bois de Witry. A : Orthophotographie IGN 50 cm (BD ORTHO, 2019) ; B : MNT LIDAR HD (2023, IGN) traité visuellement (pente + LRM en transparence).

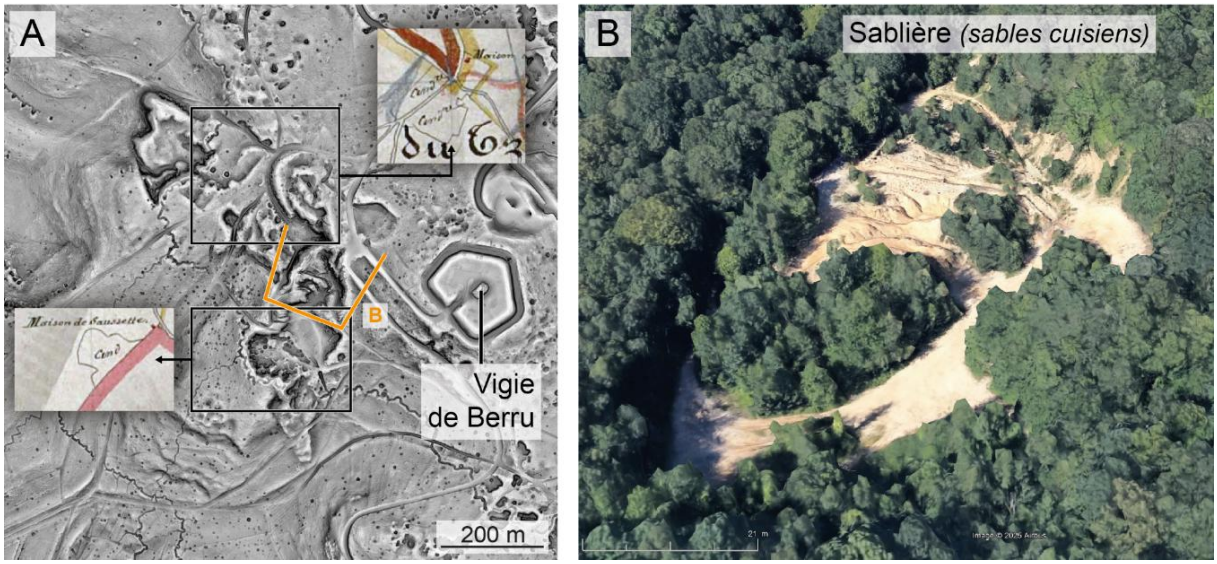


Figure 5.98 : Secteur d'extraction morphologiquement complexe, situé à la base des sables cuisiens. A : MNT LIDAR HD (2023, IGN) traité visuellement (pente + LRM en transparence) ; B : Vue en 2,5D de la sablière existant dans les sables cuisiens à l'ouest de la vigie de Berru (Airbus, 2026, visualisé via Google Earth).



Figure 5.99 : Signature morphologique correspondant à une terrière si aucune extraction rocheuse postérieure n'a eu lieu. A : MNT LIDAR HD (2023, IGN) traité visuellement (pente + LRM en transparence) ; B : Plan cadastral de la section B1 de la commune de Berru de 1835 (AD51, 3 P 753/4) ; C : Extrait du récapitulatif des états de la section B (AD51, 3 P 51 2-3).

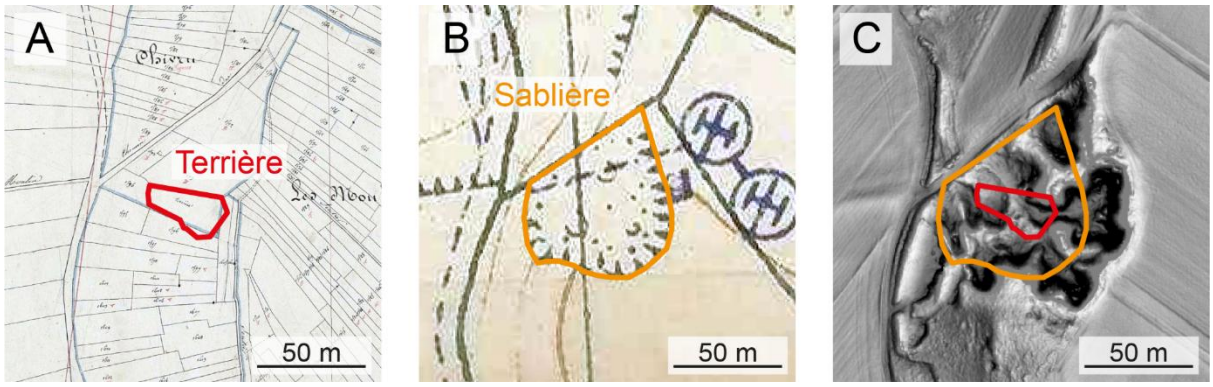


Figure 5.100 : Emprise spatiale des sites d'extraction de géomatériaux de la Côte du Moulin à Berru. A : Plan cadastral de la section B2 de la commune de Berru de 1835 (AD51, 3 P 753/5) ; B : Plan directeur au 1/10 000 de Berru du 29 octobre 1917 (AAFNA) ; C : MNT LIDAR HD (2023, IGN) traité visuellement (pente + LRM en transparence).

Indépendamment de l'inventaire LiDAR, qui recense 117 carrières, l'exploitation des sources archivistiques a permis d'identifier 100 occurrences correspondant à 62 sites d'extraction (**tab. 5.27**). Près de 77 % de ces occurrences proviennent des quatre documents les plus anciens mobilisés (cadastre napoléonien, notice géologique de 1873, atlas de Poinsignon, plans directeurs des GCTA).

		Sources archivistiques														Somme
		CN		NG		AP		GCTA		SH50		CG		SC25		
Type de site d'extraction	Carriere indéterminé (22)	1	1			1	1	18	1	4	0	8	0	1	0	33
	Cendriere (11)	8	7	3	2	2	2	4	0							17
	Extraction de Meulière (5)			5	5			2	0							7
	Puits d'argile (1)			1	1											1
	Sablière (16)	1	1	13	12			10	4	1	0	8	0			33
	Terrière (7)	7	7					1	0			1	0			9
Somme		17		22		3		35		5		17		1		100

Tableau 5.27 : Résultats de l'inventaire archivistique des sites d'extraction du Mont de Berru. Entre parenthèses, nombre d'occurrences cartographiques par type de site sans redondance entre les différents millésimes ; en noir dans le tableau, occurrences par document cartographique ; en rouge, sites reconnus à la fois sur les documents cartographiques et sur le LiDAR ; sommes en ligne, nombre total de carrières identifiées par document ; sommes en colonne, total par type de géomatériaux incluant les sites redondants. AP : Atlas de Poinsignon ; CG : Carte géologique au 1/50 000 ; CN : Cadastre napoléonien ; GCTA : Plan directeur des Groupes de canevas de tir des armées ; NG : Notice géologique du Mont de Berru de 1873 ; SC25 : Scan 25® IGN ; SH50 : Scan 50® Historique IGN.

Sur ces 100 occurrences, 37 correspondent à des carrières en activité et précisent le type de géomatériaux extrait entre 1835 et 1875. Cette forte représentation s'explique par la nature même des sources mobilisées. Le cadastre napoléonien vise à une restitution précise de l'occupation du sol à des fins fiscales. La notice géologique de 1873 décrit les sites d'extraction contemporains afin de documenter la géologie locale. L'atlas de Poinsignon a pour objectif d'inventorier les richesses économiques de chaque canton de la Marne, incluant les carrières.

À l'inverse, les documents postérieurs à la Première Guerre mondiale, en particulier les plans directeurs des GCTA, se limitent généralement à localiser les carrières sans préciser leur état d'activité ni la nature des géomatériaux exploités.

En l'absence, sur la butte de Brimont, d'une notice géologique équivalente à celle des années 1870, un inventaire archivistique d'un niveau de détail comparable n'a pas pu être mené.

5.4.1.3. Butte-témoin de Brimont

Le Mont de Brimont forme une butte-témoin de plus faible envergure (5 km² pour 170 m d'altitude) également drapée de formations tertiaires. Son sommet est coiffé par un lambeau de marnes sparnaciennes (Yprésien supérieur), reposant sur les sables grésifiés du Thanétien, eux-mêmes implantés sur la craie du Campanien (*cf.* partie 3.2 ; fig. 5.101).

L'inventaire LiDAR a permis de cartographier 24 sites d'extraction. Leur superficie varie de 100 à 3 000 m², atteignant exceptionnellement 9 000 m², pour une surface cumulée de 24 000 m² (2,4 ha ; fig. 5.101 ; tab. 5.28).

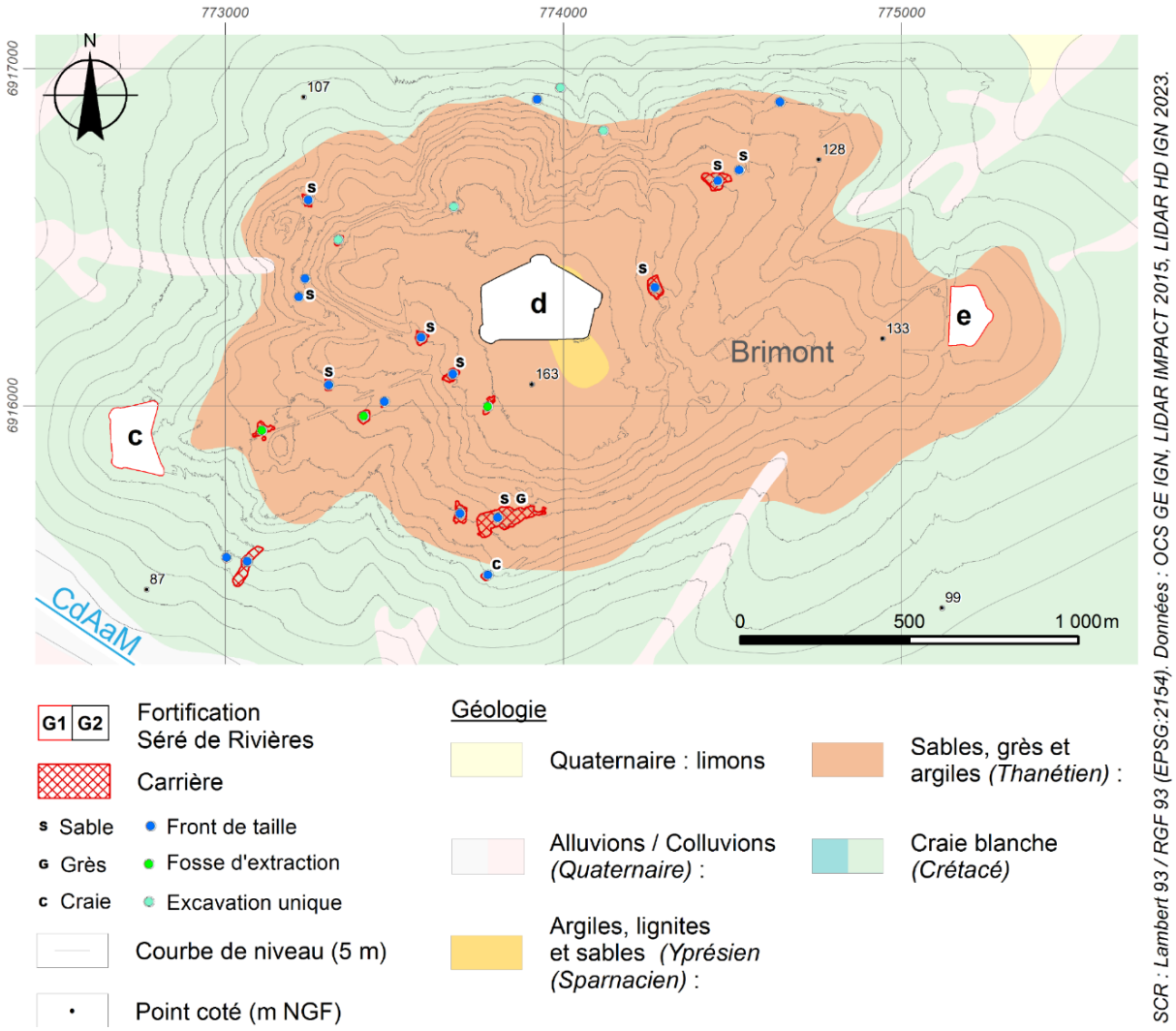


Figure 5.101 : Inventaire des carrières du Mont de Brimont selon le type de morphologie et de géomatériaux exploité. CdAaM : Canal de l'Aisne à la Marne.

La butte modelée dans le Thanétien présente 9 sablières creusées sur les versants entre 127 et 156 m (fig. 5.102). La forme dominante est celle d'une sablière à front de taille unique. Leur usage est similaire à celui observé au Mont de Berru : petite industrie, construction et travaux publics. Ce contexte explique l'implantation, en 1880, d'une importante verrerie consommatrice de sables blancs au pied sud de la butte, en bordure du canal de l'Aisne à la Marne et de la voie ferrée de Reims à Laon.

Au droit de la plus vaste sablière (9 000 m²) attestée sur le plan directeur de Brimont, la prospection pédestre a révélé une extraction de grès quartzitique sans doute exploitée entre la fin du XIXe et le début du XXe siècle (fig. 5.103A-B). Un petit front de taille situé au sud

de cette grande excavation a par ailleurs été identifié comme la seule crayère du site à partir de la carte géologique récente.



Figure 5.102 : Sablière à front de taille unique de la butte de Brimont (sables jaune thanétiens à niveaux grésifiés ou calcarénites ; cl : Alain Devos).

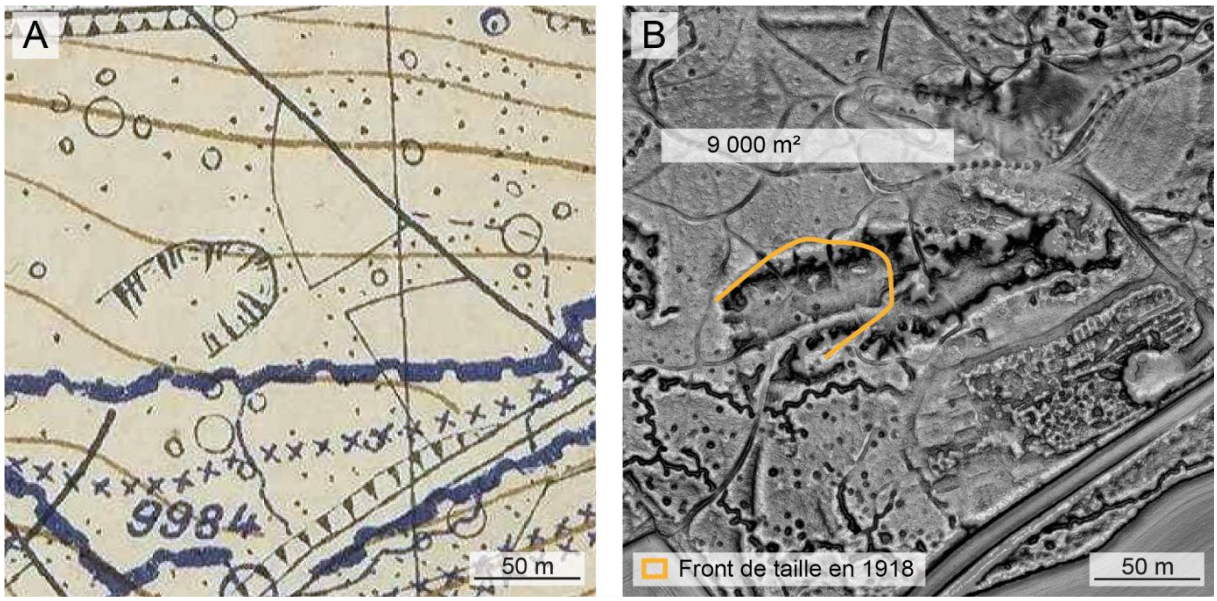


Figure 5.103 : Sablière du Belvédère au sud de la butte de Brimont (communes de Courcy et Brimont). A : Plan directeur de Brimont SO au 1/10 000 du 25 mars 1917 ; B : MNT LIDAR HD (2023, IGN) traité visuellement (pente + LRM en transparence).

Dans le cadre de l'inventaire archivistique, aucune des carrières identifiées au LiDAR n'apparaît sur les documents antérieurs à la Première Guerre mondiale, à l'exception d'une terrière figurant au sud de la butte sur le cadastre napoléonien. Comme pour les sites observés à Berru (fig. 5.99A-C, 5.100A-C), la morphologie actuelle de cette terrière, nettement plus étendue que son emprise initiale, interroge quant à l'évolution du site ou à une éventuelle réaffectation contemporaine, non vérifiée sur le terrain (fig. 5.104A-B). Il est par ailleurs plausible que certaines petites formes non identifiées au LiDAR correspondent également à des terrières, plutôt qu'à de petites sablières.

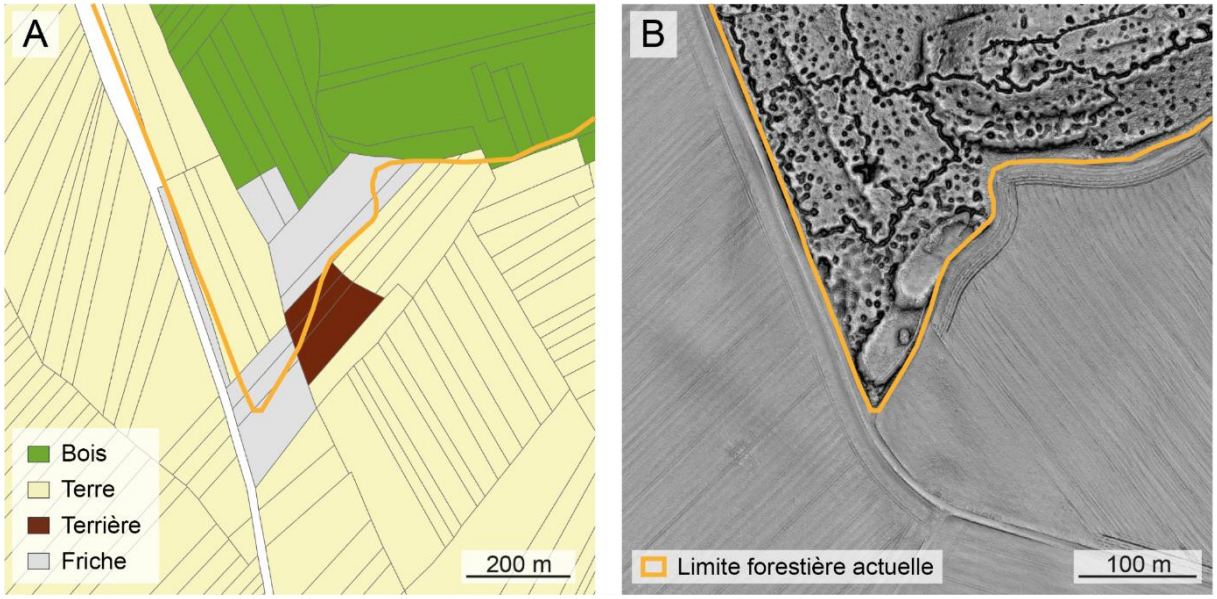


Figure 5.104 : Terrière du Mont-Ronin (Courcy). A : Couverture du sol en 1834 d'après le cadastre napoléonien de Courcy (AD51, 3 P 892-3) ; B : MNT LIDAR HD (2023, IGN) traité visuellement (pente + LRM en transparence).

Malgré l'absence de correspondance cartographique directe, les sources écrites attestent d'une activité extractive sur la butte dès le XIXe siècle. Povillon-Piérard (1826) mentionne en effet l'existence de nombreuses carrières à ciel ouvert fournissant des grès et des sables, exploités pour la construction et le pavage de la voirie rémoise depuis le XIVe siècle.

La situation diffère pour le Massif de Saint-Thierry, en raison d'un corpus archivistique moins fourni que celui disponible pour les deux buttes-témoins. En l'absence de documents équivalents au cadastre napoléonien et à la notice géologique de 1873, l'inventaire repose sur un nombre plus restreint de sources, ce qui limite le niveau de détail atteignable.

5.4.1.4. Massif de Saint-Thierry

Enfin, sur le secteur du Massif de Saint-Thierry, les formations paléogènes forment la cuesta d'Île-de-France, avec une dépression orthoclinale creusée dans les sables thanétiens, un revers armé par le Calcaire grossier du Lutétien et enfin la corniche calcaire sur les formations argilo-sableuses de l'Yprésien (Cuisien, Sparnacien) formant le front de côte (fig. 5.105A-C).

L'inventaire LiDAR y a permis d'identifier 35 carrières réparties sur l'ensemble des unités géologiques, avec des surfaces comprises entre 161 m² et plus de 457 000 m² d'un seul tenant, soit 75 % de la surface extractive totale du secteur (tab. 5.26). L'absence de carrière souterraine, qui pourrait surprendre, peut s'expliquer par le faible recouvrement du Calcaire grossier par les Marnes et Caillasses du Lutétien supérieur.

Le croisement des sources archivistiques, moins approfondi que pour la butte de Berru (19 km²), ne permet de caractériser qu'un nombre restreint de géomatériaux extraits sur la butte de Brimont (5 km²). Toutefois, l'atlas de Poinsignon suggère des types d'exploitation comparables, en cohérence avec la similitude des faciès cénozoïques et des morphologies observées sur les deux sites (fig. 5.105A-C).

Des sablières à front de taille unique sont identifiées dans les formations sableuses thanétiennes et, plus fréquemment, dans les sables cuisiens. La feuille du canton de Fismes de cet atlas signale l'existence de sites spécifiquement dédiés à l'industrie verrière et cristallière (fig. 5.105C). La mention de « cendres sulfureuses » au nord de Chenay atteste également la présence ancienne de cendrières destinées à l'amendement agricole, bien qu'aucune morphologie correspondante ne soit aujourd'hui identifiable. Enfin, l'indication « pierre à bâtir » sur le plateau traduit l'exploitation de calcaires employés pour la maçonnerie d'appareil.

La principale spécificité du massif réside dans l'exploitation des calcaires lutétiens, formés d'une alternance de bancs calcaires décimétriques et d'inter-bancs calcaréo-sableux plus tendres (fig. 5.106 ; Laurain, 1986) affleurant sur le revers de la côte d'Île-de-France, qui constitue l'extrémité orientale du plateau du Lutétien. Huit sites d'extraction sont signalés sur les hauteurs de Pouillon et Villers-Franqueux (fig. 5.105B).

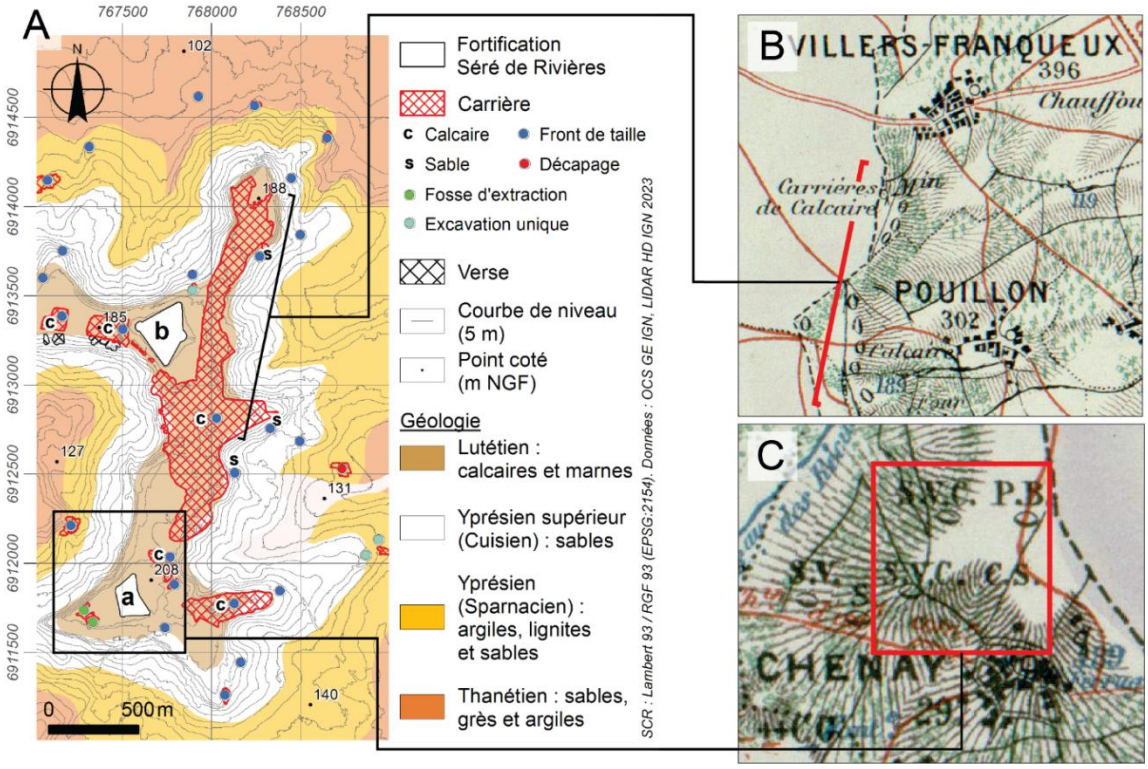


Figure 5.105 : Inventaire des carrières du Massif de Saint-Thierry selon les types de morphologie et de géomatériaux exploités. A : Carte géologique du secteur et inventaire des carrières ; B : Feuille du canton de Bourgogne de l'atlas de Poinsignon (1875) ; C : Feuille du canton de Fismes de l'atlas de Poinsignon (1876). P.B. : Pierre à bâtir (calcaire) ; S : Sables ; S.V. : Sables pour verreries ; S.V.C. : Sables pour verreries et cristalleries ; C.S : Cendres sulfureuses.

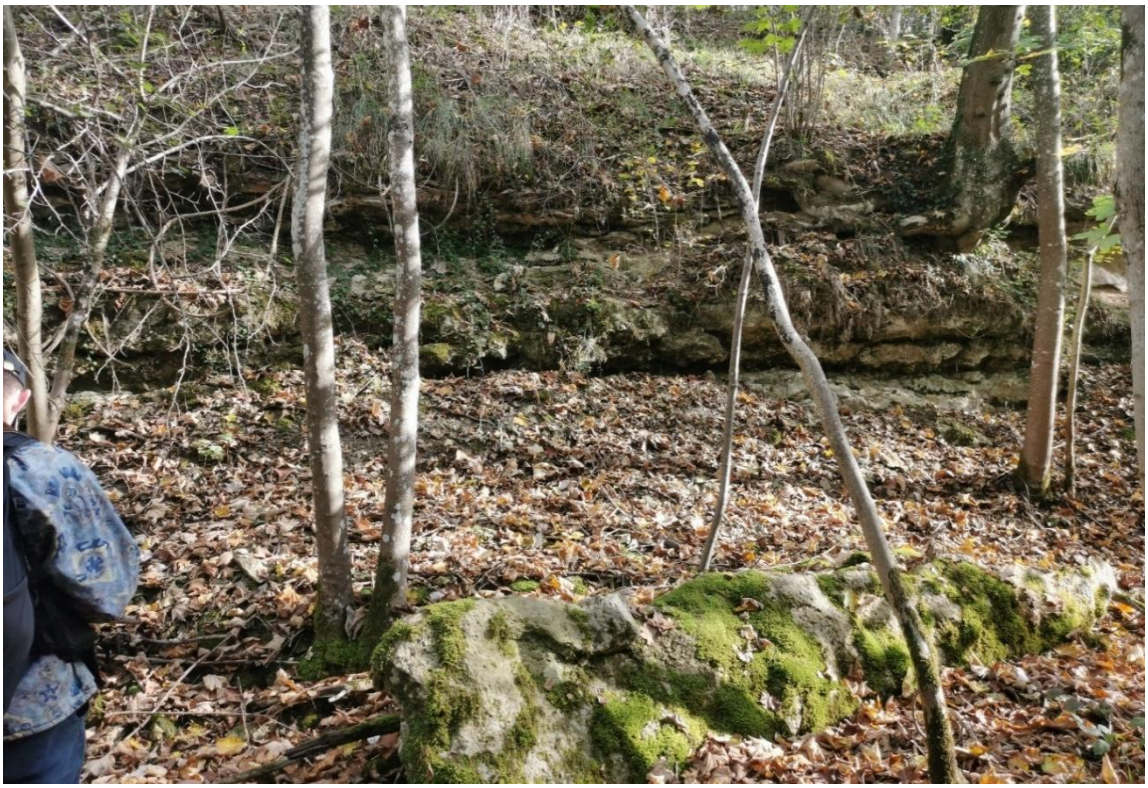


Figure 5.106 : Affleurements de calcaires lutétiens dans le fossé du fort de Saint-Thierry (cl : Alain Devos ; octobre 2022).

Les données LiDAR mettent en évidence un bouleversement topographique majeur, donnant lieu à des morphologies particulièrement complexes. Cette complexité tient en premier lieu aux superficies concernées. Les cinq sites d'extraction les plus étendus du Massif de Saint-Thierry, chacun supérieur à 11 000 m², correspondent tous à des exploitations de calcaire. La forme extractive la plus imposante du Pays rémois est localisée dans ce secteur, avec une carrière atteignant près de 46 ha, dont la géométrie est étroitement conditionnée par l'extension des calcaires lutétiens (fig. 5.107A-C). Cette seule entité représente plus de 75 % de la surface extractive et plus de 5 % de la superficie totale du secteur du Massif de Saint-Thierry.

L'approche diachronique révèle un polyphasage marqué par l'activité d'extraction des calcaires lutétiens. Absente du tiers nord-occidental de l'interfluve en 1777 (fig. 3.36A-B ; annexe 21), cette exploitation débute vraisemblablement entre la fin du XVIIIe et le début du XIXe siècle, avant de se prolonger tout au long du XXe siècle (fig. 5.108A-C). La carte d'État-Major, vers 1830, signale déjà trois secteurs en activité autour de l'actuel fort de Saint-Thierry : au droit du fort, au nord-est du plateau, et au sud sur le terroir de Merfy (fig. 5.108A).

Durant la Première Guerre mondiale, de nouvelles phases d'exploitation sont suggérées par l'apparition de ruptures de pente caractéristiques, notamment en amont du vallon de Trigny, à la latitude de la source de Begusson, de part et d'autre du plateau, ainsi que sur son extrémité septentrionale (fig. 5.108B). Après la Seconde Guerre mondiale, les photographies aériennes attestent de la poursuite de l'extraction au sud et à l'ouest du fort (fig. 5.108C), probablement en continuité spatiale avec les sites antérieurs, si l'implantation de la fortification n'avait pas constitué un obstacle morphologique.

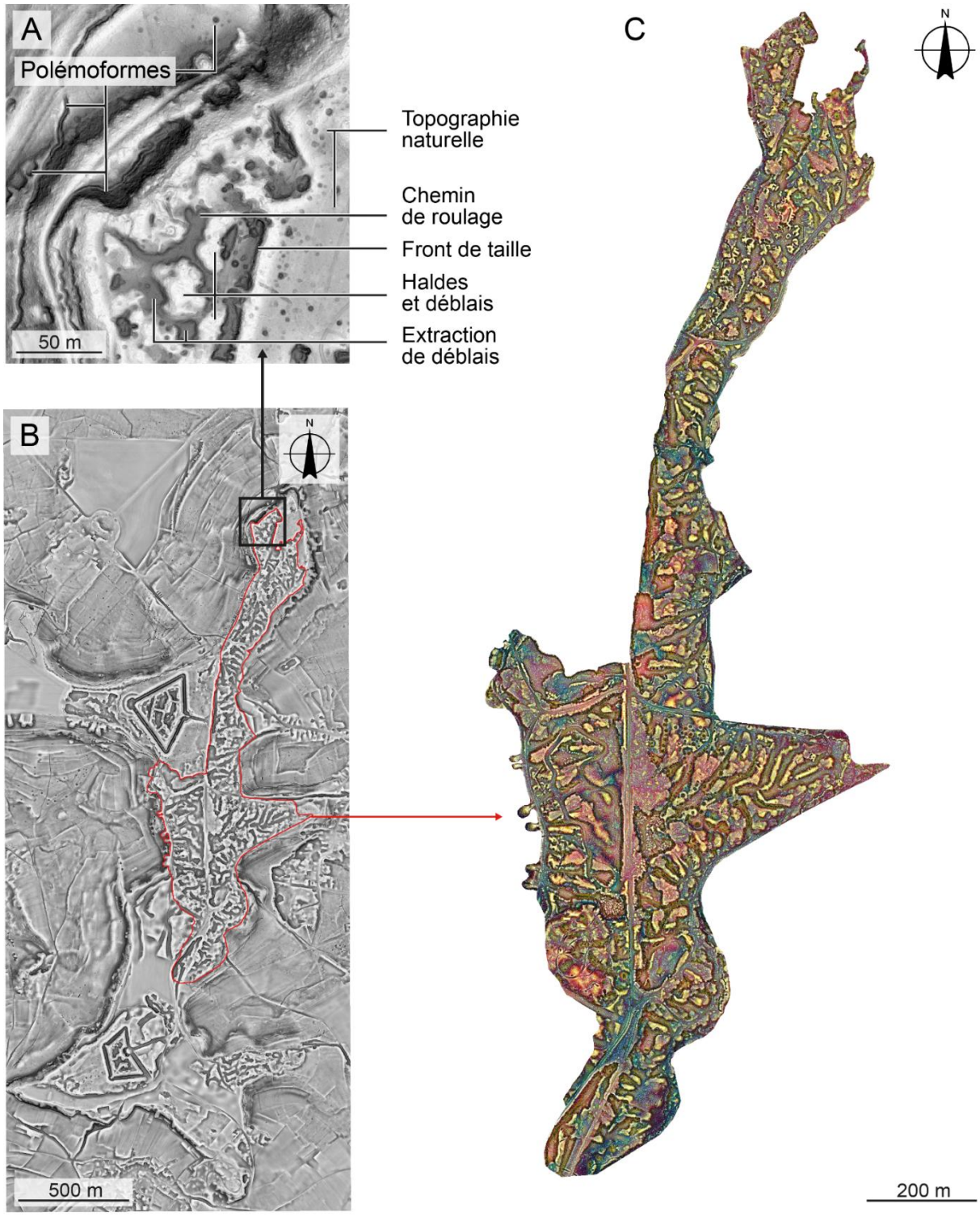


Figure 5.107 : Signatures morphologiques relatives à l'extraction de calcaire sur le Massif de Saint-Thierry (MNT LIDAR HD IGN 2023 traité visuellement). A : Morphologies internes au site d'extraction (pente + LRM en transparence) ; B : Plateau sommital du Massif de Saint-Thierry (pente + LRM en transparence) ; C : Exploitation de calcaire de 46 ha (traitement e^{4}MSTP).

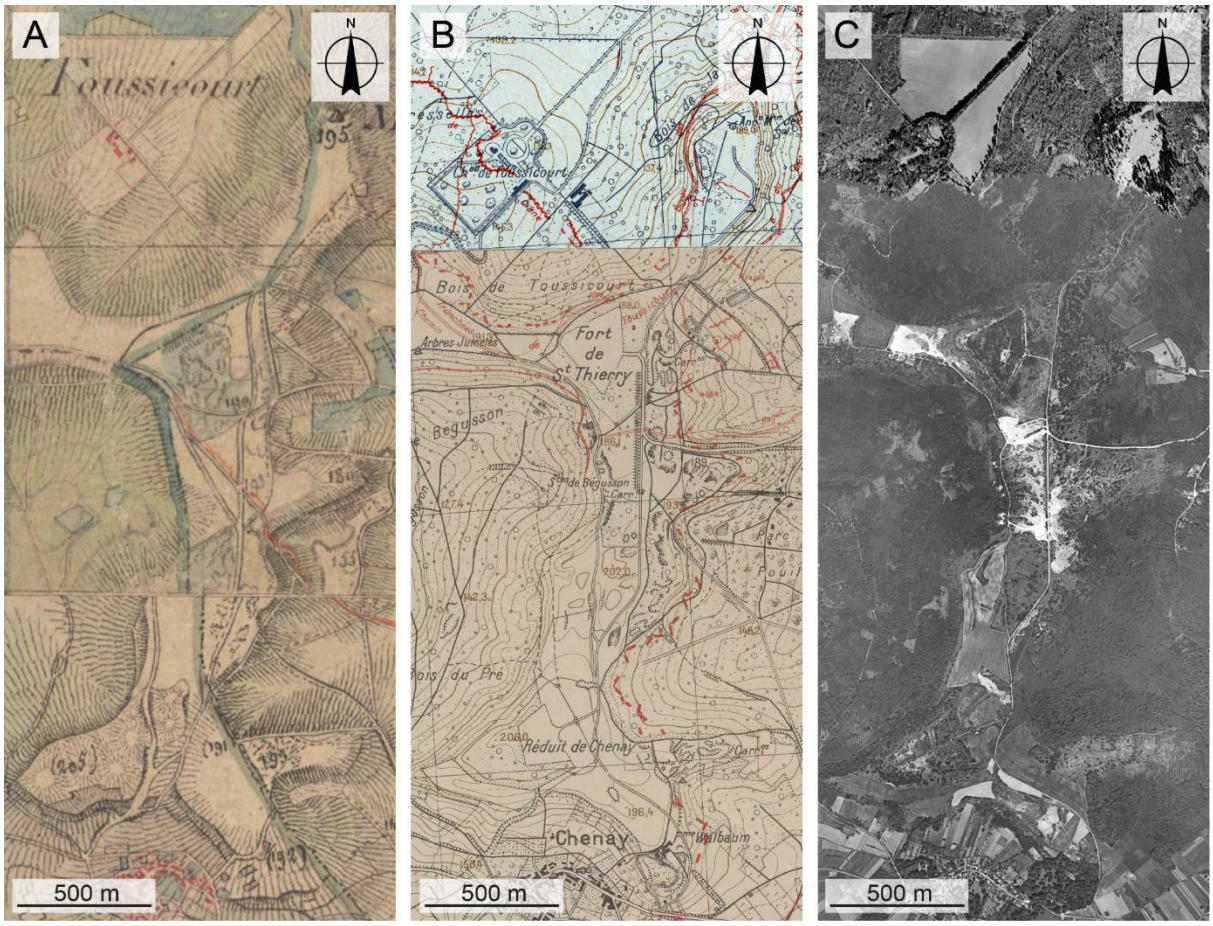


Figure 5.108 : Évolution de l'activité extractive calcaire d'après les sources cartographiques et photographiques. A : Feuilles de Reims NO et Reims SO de la carte d'État-Major (1825-1831) ; B : Plans directeur de Jonchery NE au 1/10 000 du 28 janvier 1918 (sud) et de Berry-au-bac SE au 1/10 000 du 1er mai 1918 (nord) ; C : Photographie aérienne de 1949 (BD ORTHO® Historique IGN, 2016).

La complexité interne de la forme confirme cette trajectoire évolutive. Les structures internes s'organisent en étroite relation avec la trame géomorphologique, autour d'une ligne de crête méridienne relictuelle supportant une piste de roulage unique, et d'un réseau d'éperons et de vallons orthogonaux disposés en arêtes de poisson. Ces structures correspondent aux plateformes d'extraction ainsi qu'aux zones de haldes et de déblais (fig. 5.107A). Certaines formes orthogonales suggèrent localement des secteurs dédiés à l'extraction des déblais. Le plateau originel ne subsiste plus que sous la forme d'un lambeau résiduel sur les hauteurs de Villers-Franqueux, avant de réapparaître plus au sud à l'approche du finage de Chenay. Au droit du fort de Saint-Thierry, la topographie lissée révélée par le LiDAR apparaît ainsi, dans sa quasi-totalité, d'origine anthropique.

Un dernier niveau de complexité résulte de la densité et de la superposition des formes postérieures, mises en évidence par l'inventaire global (fig. 5.1). Les polémoformes en constituent l'expression la plus marquée. La construction du fort de Saint-Thierry entre 1877 et 1879 a détruit et recouvert une partie de la carrière préexistante (fig. 3.36).

L'intégration ultérieure du massif aux troisième et quatrième positions défensives durant la Première Guerre mondiale a conduit à l'insertion de tranchées, de boyaux, d'abris et de positions d'artillerie au sein même de ces réseaux de carrières à ciel ouvert, eux-mêmes soumis à des tirs d'artillerie plus ou moins intenses (fig. 5.107A-B, 5.108B).

À l'échelle du Pays rémois, des sites d'extraction sont identifiés sur l'ensemble des unités géomorphologiques, aussi bien sur les buttes cénozoïques qui jalonnent l'entonnoir de percée cataclinale de la Vesle que sur la côte d'Île-de-France au niveau du Massif de Saint-Thierry. Les travaux de Berthe (2024) montrent que ces exploitations sont également présentes sur la Montagne de Reims, étendant ce constat à l'ensemble du Pays de Reims.

Plusieurs morphotypes se dégagent, avec des formes dominantes propres à chaque secteur et étroitement associées à des géomatériaux spécifiques. Sur le Mont de Berru, l'inventaire met en évidence des sablières exploitées dans les sables thanétiens et cuisiens, des cendrières à front de taille unique liées aux argiles sparnaciennes, ainsi que plusieurs fosses d'extraction de meulière. Sur le Mont de Brimont, les formes principales correspondent à des sablières à front de taille unique, localement mobilisées pour l'extraction de grès quartzitiques issus des sables thanétiens. Sur le Massif de Saint-Thierry, l'exploitation dominante concerne des carrières de calcaire lutétien à fronts multiples, caractérisées par une forte complexité morphologique. Elles sont associées à des sablières à front simple développées dans les sables thanétiens et cuisiens, et plus marginalement à des sites liés à l'exploitation de cendres issues des argiles sparnaciennes.

La chronologie documentée de ces activités extractives s'étend du XVIIIe siècle à la période actuelle. Les premières attestations concernent notamment les cendrières, dont le développement apparaît précoce. L'intensité maximale de l'activité se situe dans le demi-siècle compris entre les années 1820 et 1870, d'après le croisement des sources archivistiques manuscrites et cartographiques. Si cette période est en partie conditionnée par la disponibilité des documents, elle correspond néanmoins à l'essor économique et industriel du XIXe siècle, marqué par une transformation profonde de la société française (Le Bas, 1984). L'abondance de formes d'extraction de géomatériaux sur les sites des forts soulève plusieurs questionnements sur l'utilisation locale des ressources pour la construction mais aussi sur les conflits d'usages entre les pratiques militaires, extractives, agricoles, viticoles et forestières.

Après l'analyse des morphologies représentées sous forme surfacique, la section suivante s'attache aux formes apparemment non militaires ou sans lien direct avec la guerre, cartographiées sous forme de polylignes.

5.4.2. Épaulements, fossés et levées

Aux morphologies du système Séré de Rivières, aux polémoformes de la Première Guerre mondiale et aux principaux sites d'extraction de géomatériaux, s'ajoutent d'autres formes archéologiques. Celles-ci correspondent majoritairement aux entités cartographiques linéaires que sont les fossés, les levées et les épaulements non militaires, dont le linéaire total atteint 159 km (tab. 5.28). Leur interprétation demeure limitée car elles ne constituent pas un objectif central de cette thèse. Leur prise en compte reste toutefois nécessaire pour éclairer le palimpseste topographique révélé par le LiDAR et documenter l'environnement archéologique au sens large.

	Epaulement non militaire			Fossé			Levée			Total	
	lin. (m)	*nb.*	*lin. / km²*	*lin. (m)*	*nb.*	*lin. / km²*	*lin. (m)*	*nb.*	*lin. / km²*	*lin. (m)*	*nb.*
MdBr (5 km²)	15 569	369	3 114	998	100	200	217	2	43	16 784	471
MdBe (19 km²)	59 307	1 066	3 121	24 478	852	1 288	992	35	52	84 777	1 953
MdST (8 km²)	30 310	623	3 789	14 645	350	1 831	2 158	57	270	47 113	1 030
Autres (3 km²)	877	10	292	56	1	19	129	4	43	1 062	15
Total	106 063	2 068	/	40 177	1 303	/	3 496	98	/	149 736	3 469

Tableau 5.28 : Statistiques relatives aux épaulements, aux fossés et aux levées (lin. : linéaire ; nb. : nombre). MdBe : Mont de Berru (19 km²) ; MdBr : Mont de Brimont (5 km²) ; MdST : Massif de Saint-Thierry (8 km²) ; Autres : Secteurs des forts de Fresne, Montbré et la Pompelle (3 km²).

L'analyse de ces formes permet, d'une part, d'affiner la compréhension de l'état initial dans lequel les forts ont été implantés et, d'autre part, d'identifier, plus occasionnellement, des structures potentiellement liées à la mise en défense du territoire ou à la Première Guerre mondiale. Les sections suivantes examinent le résultat des inventaires cartographiques en présentant la situation générale pour chaque type de forme.

5.4.2.1. Épaulements

Les épaulements constituent les formes linéaires les plus largement représentées dans les secteurs étudiés, avec plus de 115 km de développement cumulé. Ils correspondent à des talus longitudinaux implantés perpendiculairement à la pente, délimitant des espaces à inclinaison réduite.

Dans le paysage agraire, ils peuvent alors renvoyer à deux catégories morphogénétiques distinctes : les terrasses et les rideaux de culture (Schwartz et al., 2020). Les terrasses correspondent à des aménagements intentionnels visant à réduire la pente pour faciliter la culture ou limiter l'érosion. Elles résultent d'une excavation qui interrompt brutalement les horizons pédologiques, l'altérite voire parfois le substratum rocheux, les déblais étant mobilisés en aval. À l'inverse, les rideaux de culture sont des formes anthropiques involontaires produites par l'accumulation progressive de colluvions à l'amont d'un obstacle, généralement une haie, dont la genèse n'implique aucun remodelage direct du

substrat. Les horizons profonds restent continus et intacts, tandis que le talus se compose d'un horizon organominéral épais issu de l'érosion des parcelles situées en amont.

D'après Schwartz et al. (2020), c'est cette différence de structure interne, observable en coupe, qui permet de distinguer de manière fiable ces deux formes qui, bien que parfois proches en surface, relèvent de logiques agraires et de processus morphogénétiques radicalement différents.

Aucune enquête pédologique n'a été menée à cette fin dans le cadre de la thèse et aucune caractérisation précise n'a été menée de manière exhaustive. Toutefois, le LiDAR révèle localement des versants sur lesquels la rupture de pente est tellement plane et large, qu'elle ne laisse que peu de doutes quant à la nature terrassée de la topographie (fig. 5.109A). À l'inverse, de nombreux épaulements ne se matérialisent que par de faibles ruptures de pente, dont la caractérisation demeure incertaine sans investigation de terrain (fig. 5.109B). Il est vraisemblable que ces deux origines coexistent dans les différents secteurs, où la densité des épaulements varie entre 3 000 et 4 000 m de linéaire (tab. 5.28).

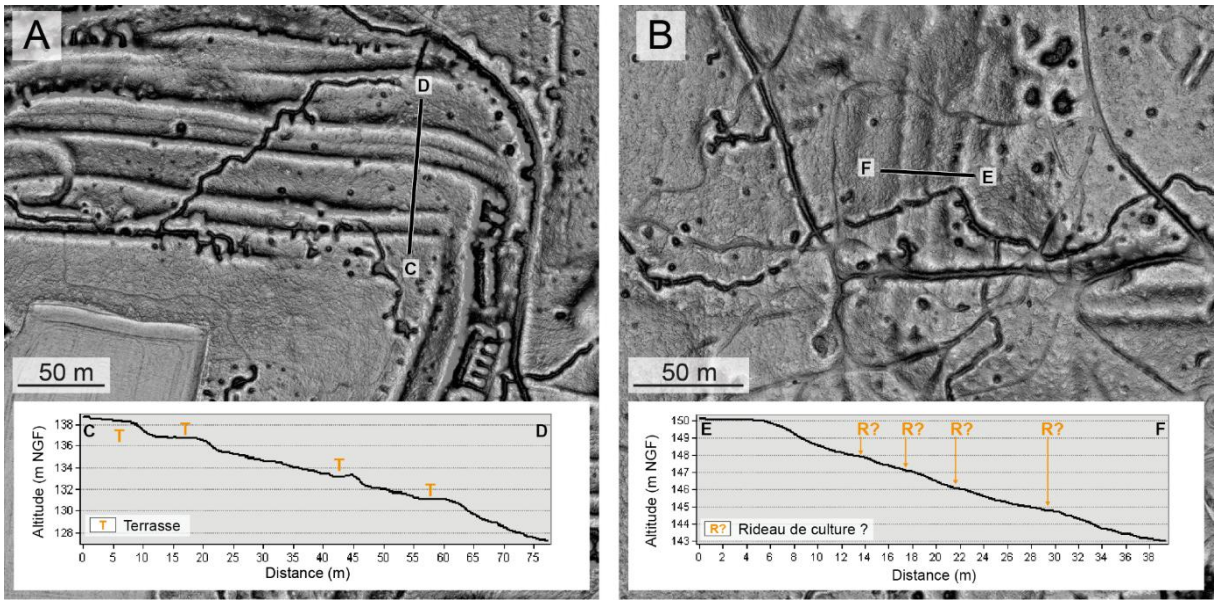


Figure 5.109 : Comparaison de deux secteurs à épaulements (MNT LIDAR HD IGN traités visuellement avec un traitement LRM superposé à un indice de pente, 2023). A : Épaulements formant des terrasses au nord de la butte de Brimont ; B : Épaulements formant de faibles ruptures de pente difficiles à caractériser sans enquête pédologique.

Sur la butte sableuse de Brimont, plus de 15 km d'épaulements ont été cartographiés, dont environ 2 km, probablement récents, au sein du parcellaire agricole actuel (fig. 5.110). Le réseau, majoritairement orthogonal et rectiligne, épouse les contours de la butte. Un contraste marqué oppose le talus septentrional, concentrant près des deux tiers du linéaire sous forêt, au talus méridional, où environ 2,6 km sont répartis, dont 24 % sous couvert forestier. L'absence de massifs forestiers jusqu'au début du XIXe siècle, suggérée par la carte

de Cassini (fig. 3.31), conduit à proposer les Temps modernes ou la période pré-révolutionnaire comme *terminus post quem* pour ces aménagements. Un agrégat d'épaulements au tracé courbe se dessine enfin au nord-ouest de la partie sommitale de la butte. L'absence totale de polémoformes dans cette zone appuie l'hypothèse d'un aménagement datant du XXe siècle (fig. 5.88).

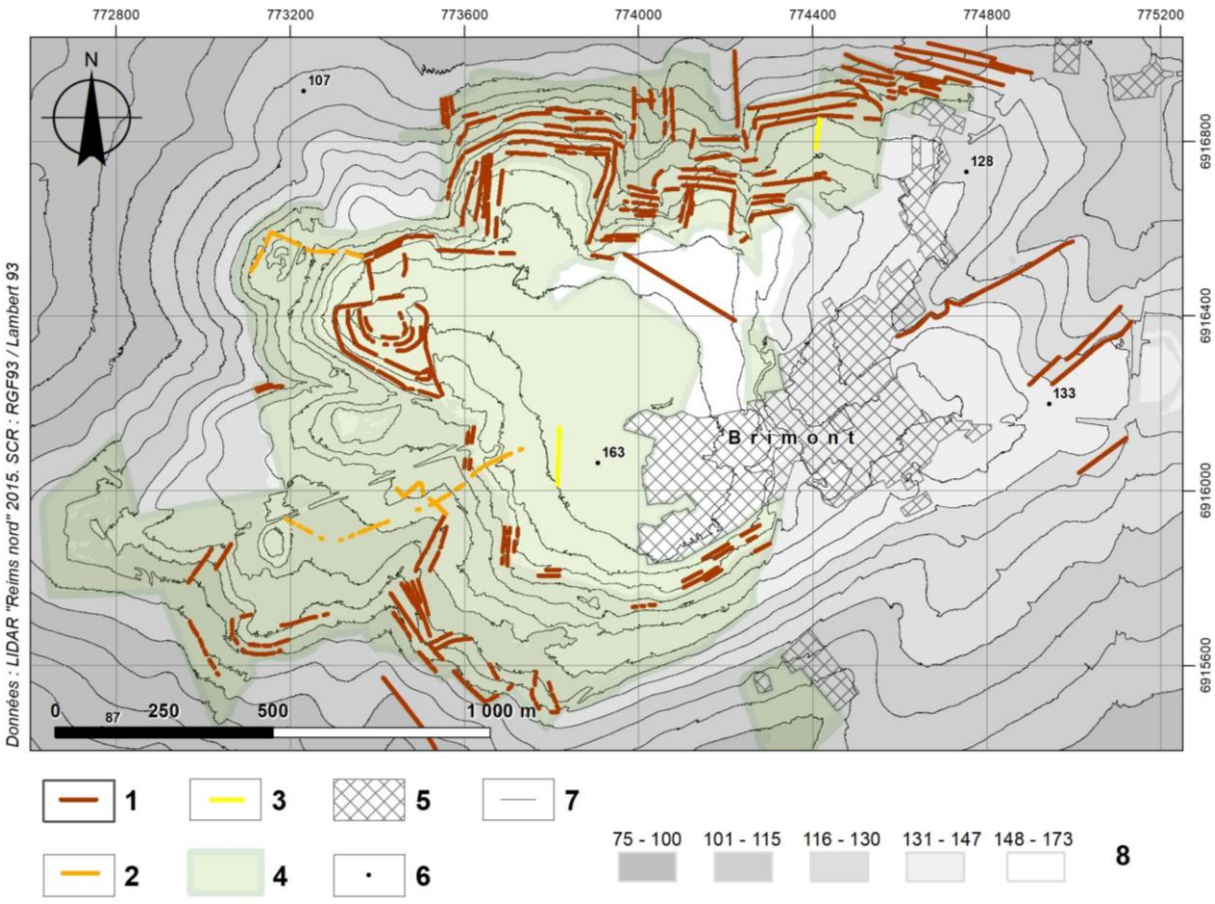


Figure 5.110 : Inventaire cartographique des épaulements, fossés et levées de la butte de Brimont. 1 : Épaulements ; 2 : Fossés ; 3 : Levée ; 4 : Surface forestière ; 5 : Emprise urbanisée ; 6 : Points cotés (en m NGF) ; 7 : Courbes de niveau (5 m) ; 8 : Altitude (en m NGF).

Une organisation comparable est observée sur le Massif de Saint-Thierry, lequel malgré sa vocation historiquement forestière, semble en grande partie défriché à la fin du XVIIIe siècle (fig. 3.34A-B, 3.35). Plus de 30 km d'épaulements se localisent sur les hauts de versants développés dans les sables cuisiens, et plus marginalement sur les argiles sparnaciennes. Leur distribution concerne l'ensemble des communes, à l'exception notable des versants sud-ouest du finage de Chenay (fig. 5.111). Ils se concentrent préférentiellement dans les rentrants topographiques, sur le front de la cuesta ou au sein des cuves topographiques d'Hermonville et du vallon de Trigny.

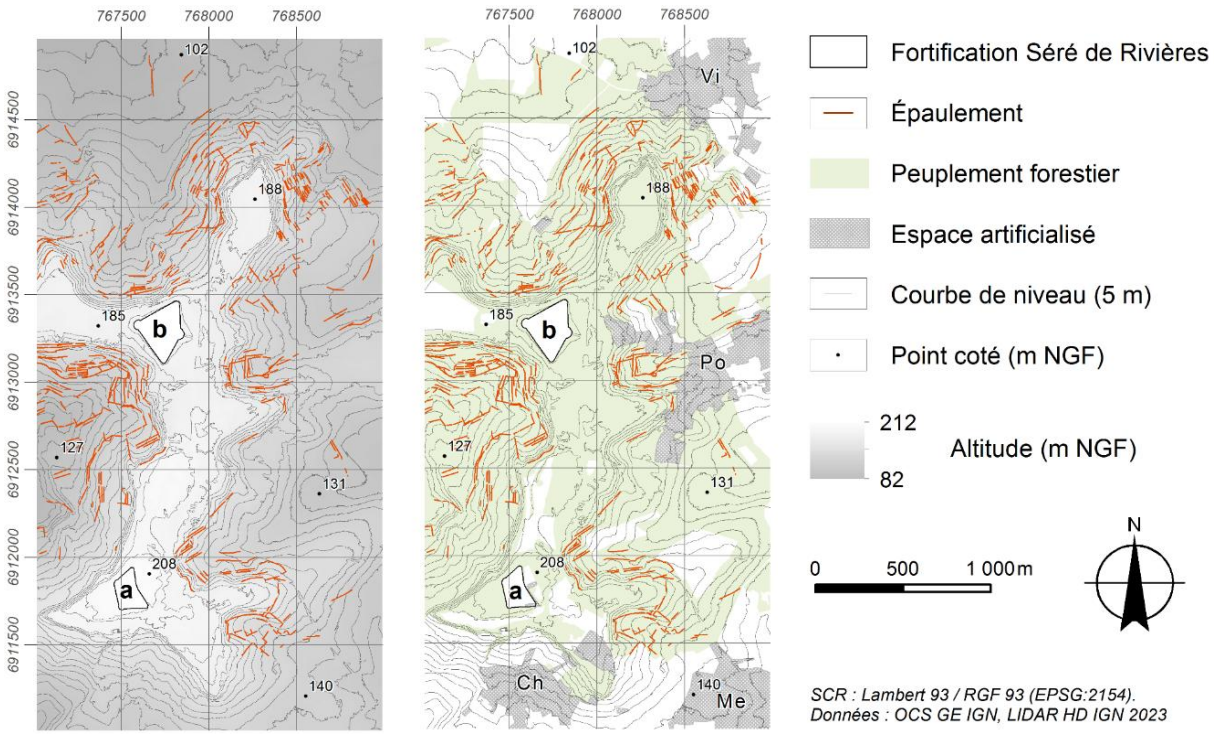
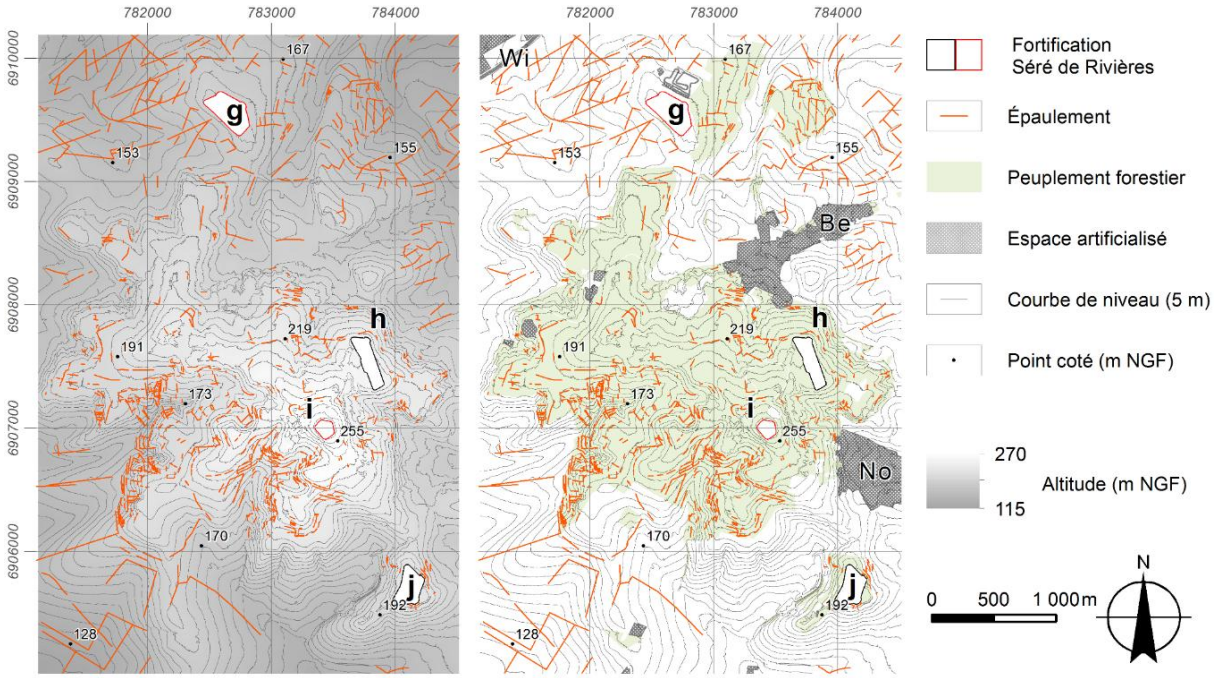


Figure 5.111 : Inventaire cartographique des épaulements du Massif de Saint-Thierry. a : Réduit de Chenay ; b : Fort de Saint-Thierry.

Sur le Mont de Berru en revanche, sur lequel s'étendent environ 40 km d'épaulements sur les versants sablo-argileux, un massif forestier est représenté sur la carte de Cassini (fig. 3.30). Une nette dichotomie ressort dans les espaces boisés actuels entre le versant sud-ouest, sur les hauteurs de Nogent-l'Abbesse et Cernay-lès-Reims, concentrant plus de 72 % du linéaire sous forêt, traduisant donc une activité agricole relativement intense, et le reste du massif (fig. 5.112). L'inventaire LiDAR a également permis de cartographier plus de 19 km d'épaulements sur le plateau champenois, malgré le nivellement agricole, portant le total à 59 km pour ce secteur. Ces linéaires se distinguent par leur longueur moyenne élevée (110 m contre 37 m sur les formations tertiaires) et par une organisation plus orthogonale, suggérant une vocation parcellaire peu contrainte par la géomorphologie (réseau de vallons secs hérités du Quaternaire ; fig. 3.3). L'histoire antique de la région, centrée sur *Durocortorum* (nom gallo-romain de Reims), qui fut un temps la capitale de la Gaule Belgique, invite à envisager une origine ancienne pour une partie de ce parcellaire, comme l'illustrent des exemples comparables documentés en milieu agricole intensif (Ritz, 2020). Cette interprétation doit toutefois rester prudente, la cartographie des épaulements militaires issue des plans directeurs des GCTA étant probablement incomplète (*cf.* partie 5.1.3.2 ; fig. 5.89A-C).



SCR : Lambert 93 / RGF 93 (EPSG:2154). Données : OCS GE IGN, LIDAR IMPACT 2015, LIDAR HD IGN 2023.

Figure 5.112 : Inventaire cartographique des fossés de la butte de Berru. g : Fort de Witry-lès-Reims ; h : Batterie de Berru ; i : Vigie de Berru ; j : Fort de Nogent-l'Abbesse.

5.4.2.2. Fossés et levées

Les fossés correspondent ici à des excavations longitudinales artificielles de profondeur généralement pluridécimétriques (fig. 4.39). L'inventaire cartographique en recense plus de 40 km, sans caractérisation fonctionnelle systématique.

La fonction de drainage apparaît dominante. Sur la butte de Berru, 61 % des fossés sont localisés sur les sols hydromorphes des argiles sparnaciennes, pour une densité de 1 288 m/km² (fig. 5.113, 5.114A-D). De même, dans le Massif de Saint-Thierry, qui concentre 36 % des structures (1 831 m/km²), les fossés s'organisent préférentiellement dans les zones marécageuses notamment situées au sein des argiles et des sables yprésiens sus-jacents, mais également dans les sables thanétiens (fig. 5.115).

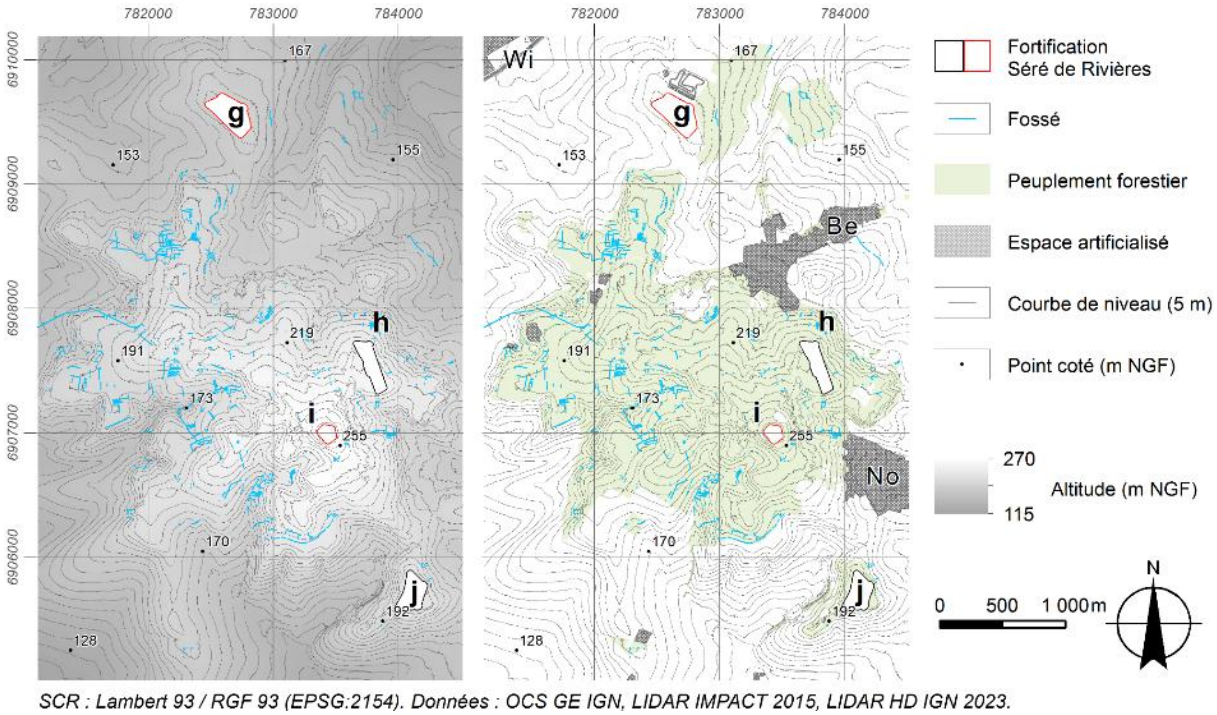


Figure 5.113 : Inventaire cartographique des fossés de la butte de Berru. g : Fort de Witry-lès-Reims ; h : Batterie de Berru ; i : Vigie de Berru ; j : Fort de Nogent-l'Abbesse.

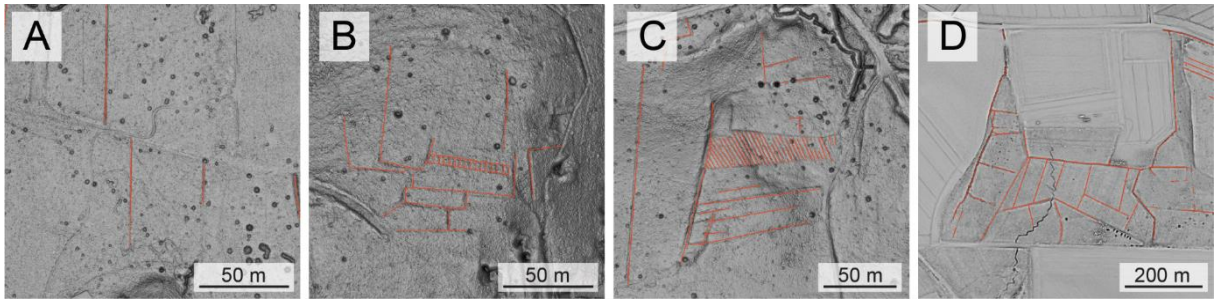


Figure 5.114 : Exemples d'organisation de drains (typologie d'après Berthe, 2024). A : Drains uniques ; B : Réseau de drains polygonaux et en peigne (réseau mixte) ; C : Réseau de drains en chevelu et en peigne (réseau mixte) ; D : Réseau de drains polygonaux (réseau simple).

Selon la typologie proposée en Montagne de Reims par Berthe (2024), les drains peuvent alors être uniques (fig. 5.114A) ou se hiérarchiser au sein de réseaux (fig. 5.114B-D), pouvant être polygonaux simples, tel qu'observé dans le Grand marais situé entre le village de Villers-Franqueux et le Château de Toussicourt (fig. 5.114D), ou mixtes mêlant par exemple des réseaux en peigne avec des réseaux polygonaux (fig. 5.114B) ou des chevelus de drains (fig. 5.114C).

La dernière catégorie de formes cartographiées avec des polylignes, dont le développement est bien moindre, correspond enfin aux levées pour environ 3 500 m sur l'ensemble des secteurs d'étude. La densité particulièrement faible, de 40-50 m/km² sur les buttes-témoins et les avant-buttes, monte jusqu'à 270 m/km² dans le Massif de Saint-Thierry. Il peut s'agir de levées composées de remblais terreux ou, dans de nombreux cas, de murs constitués de

pierres sèches. Ce type de linéaire matérialise habituellement des limites parcellaires administratives, cadastrales ou pastorales, ou peut délimiter des voies.

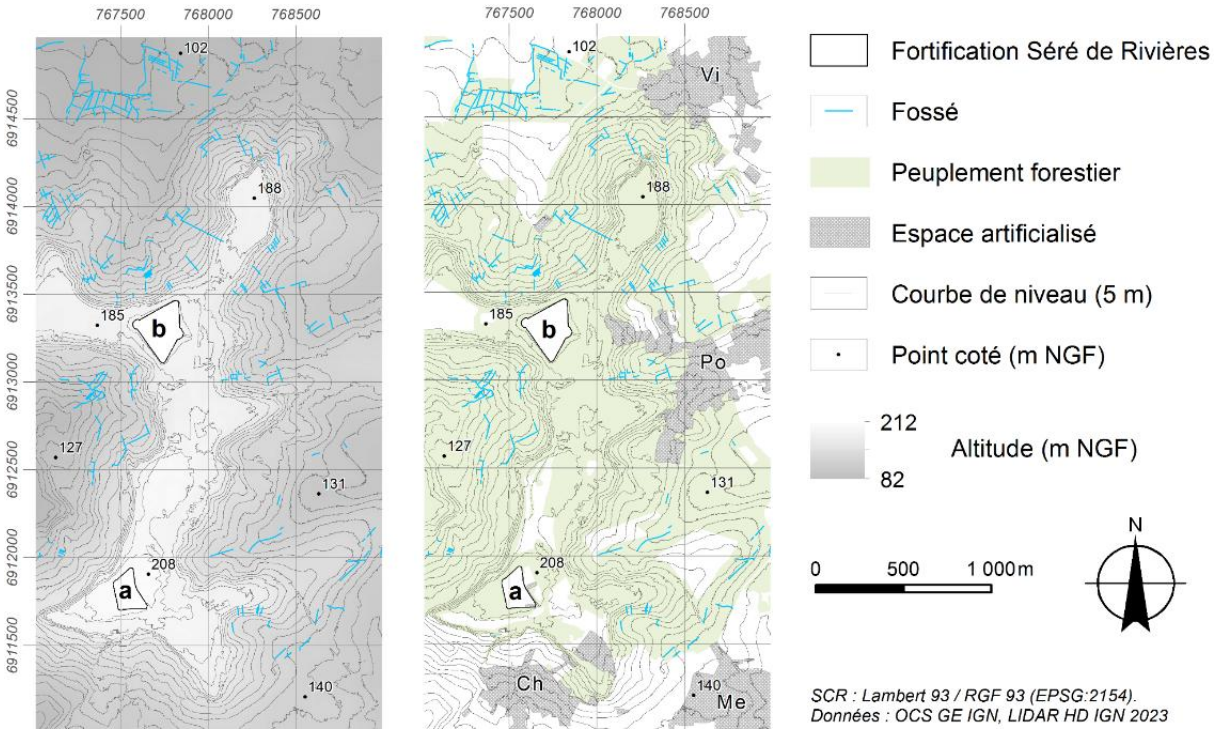


Figure 5.115 : Inventaire cartographique des fossés du Massif de Saint-Thierry. a : Réduit de Chenay ; b : Fort de Saint-Thierry.

Deux structures retiennent néanmoins l'attention du fait de leurs dimensions, de leur représentation cartographique sur les plans directeurs de la Première Guerre mondiale, et de leur proximité avec un fort Séré de Rivières.

La première, d'une hauteur d'un à deux mètres et d'une largeur de 1 à 3 m environ, se situe au sud-est du fort de Saint-Thierry (fig. 5.116A-C). Elle démarre au niveau du glacis du fort et longe sur près de 250 m la voie principale qui traverse le plateau longitudinalement. Le plan directeur de Jonchery-sur-Vesle fait apparaître à cet endroit un figuré linéaire noir suggérant donc que cet objet ne correspond pas à une polémoforme de la Grande Guerre, auquel cas elle apparaitrait en couleur, mais à une structure antérieure à l'élaboration des plans directeurs.

De la même manière, une seconde anomalie topographique linéaire, représentée en noir sur le plan directeur de Brimont, ressort au sud-ouest du fort de Brimont (fig. 5.117A-B). Partant des abords du glacis en direction de la batterie de Loivre, elle se présente sous la forme d'une levée d'environ 4 m de largeur au sommet, dont la hauteur, proche de 5 m à son origine, décroît progressivement sur près de 400 m, au point de s'inverser ensuite en un fossé sur environ 200 m. Cette transition longitudinale, marquée par une diminution continue du dénivelé, évoque la possibilité d'un plan incliné sur plus de 600 m de longueur.

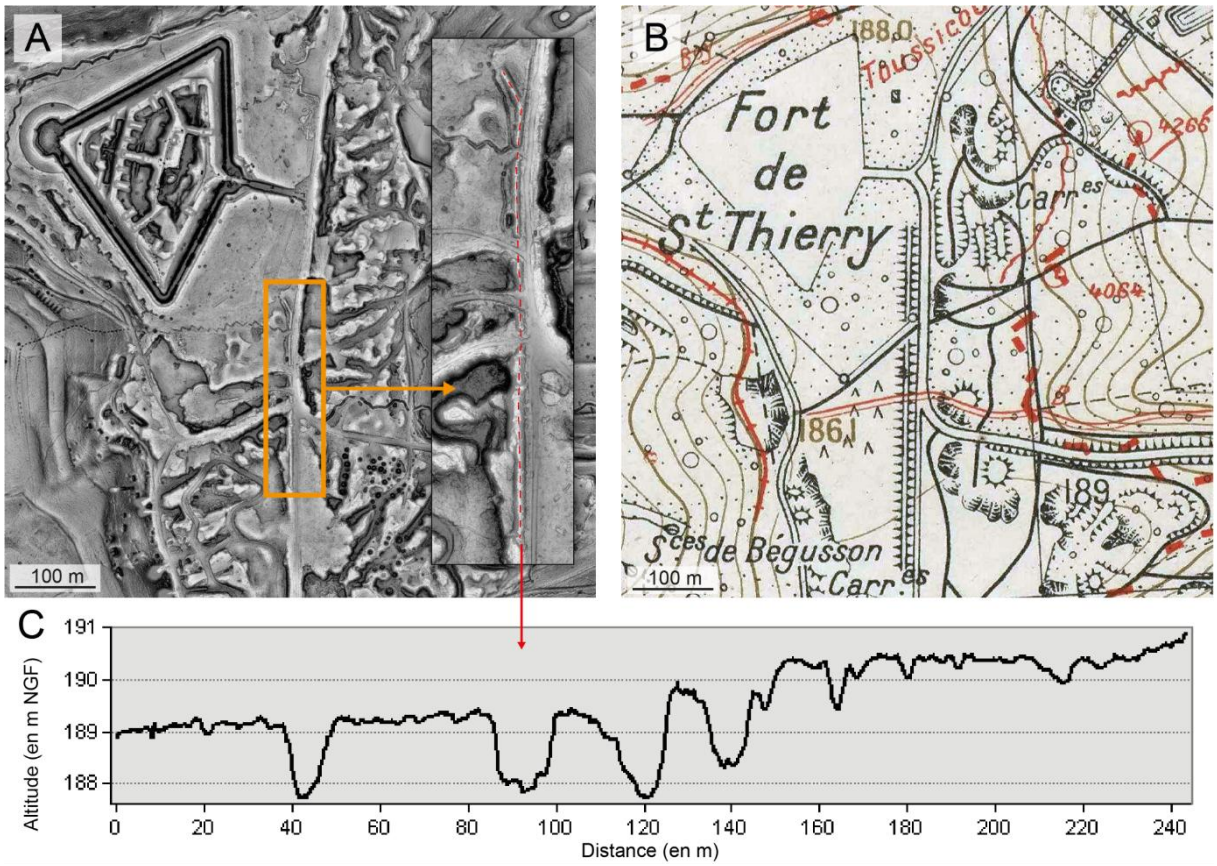


Figure 5.116 : Levé topographique de grande envergure sur le plateau sommital du Massif de Saint-Thierry. A : MNT LIDAR HD (2023, IGN) traité visuellement (pente + LRM en transparence) ; B : Plan de Jonchery-sur-Vesle NE au 1/10 000 du 28 janvier 1918 ; C : Coupe topographique de la levée.

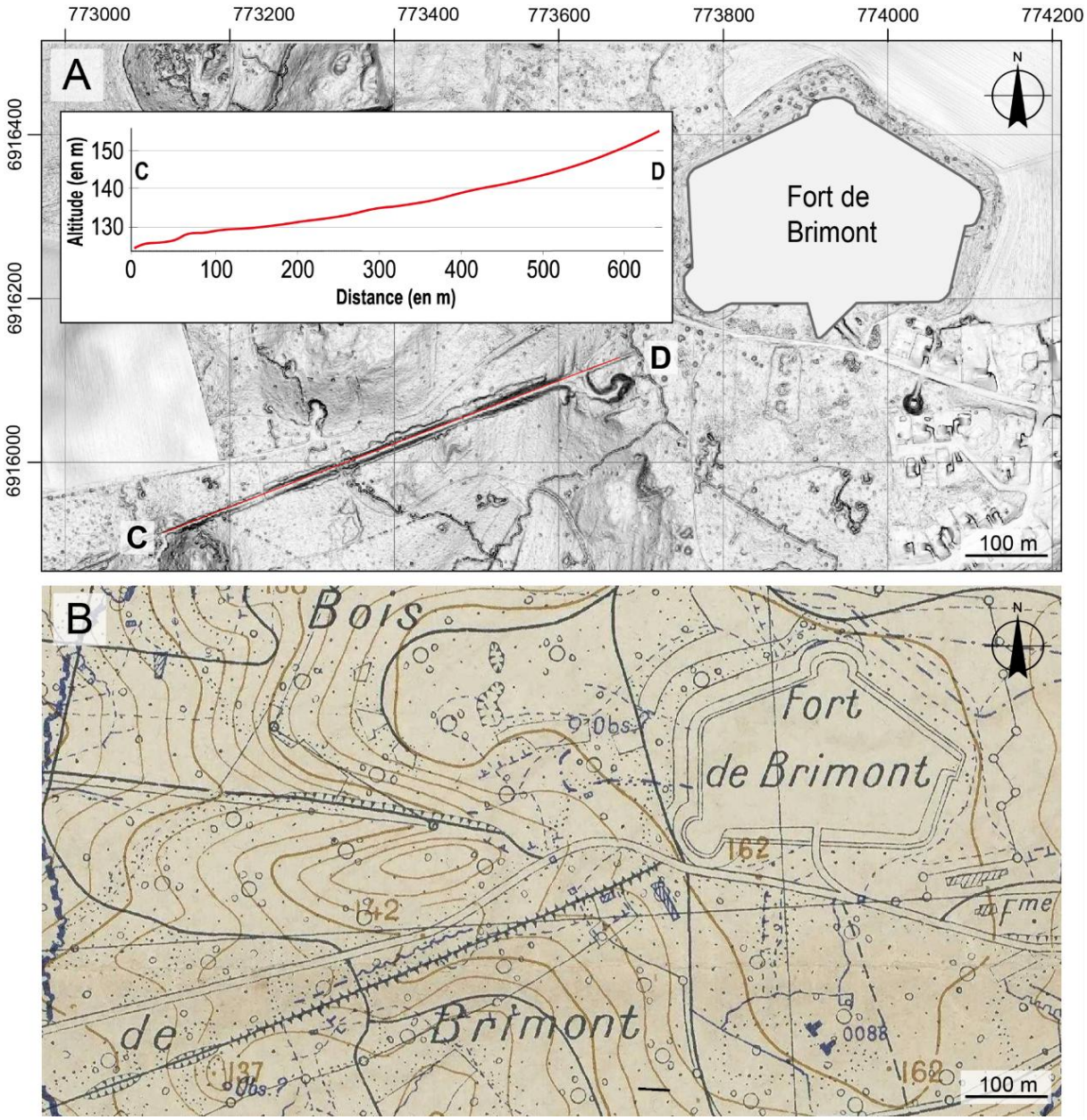


Figure 5.117 : Levée topographique de grande envergure sur le flanc de la butte de Brimont. A : MNT LIDAR HD (2023, IGN) traité visuellement (indice de pente) ; B : Plan de Brimont SO au 1/10 000 du 25 mars 1917.

Conclusion de la partie 5.4

L'inventaire des carrières, des épaulements, des fossés et des levées non directement liés à la militarisation permet de compléter la lecture morphologique du palimpseste topographique, en replaçant les polémoformes dans un environnement archéologique plus large. Sans viser l'exhaustivité, cette analyse fait ressortir des types récurrents et des fonctions dominantes.

Les carrières, qui couvrent plus de 150 ha dans le Pays rémois, à des échelles micro- et mésotopographiques, attestent l'exploitation de l'ensemble des géomatériaux fournis par les séries sédimentaires locales. Les épaulements et les fossés, dont le linéaire atteint 150 km, renvoient quant à eux à des dynamiques agro-sylvicoles anciennes, parfois difficiles à distinguer des aménagements militaires tardifs, mais essentielles pour comprendre l'état initial des reliefs au moment de l'implantation des forts.

Ces observations amènent à interroger la manière dont les polémoformes interagissent avec ces formes. Certaines de ces formes sont-elles relatives à la construction des forts, ont-elles été impactées ou créées à cette occasion ?

Conclusion du chapitre 5

La décomposition du palimpseste topographique permet d'identifier les principales couches morphologiques présentes sur les 35 km² étudiés, et de comprendre les relations d'adjacence, d'inclusion et d'intersection qui rendaient initialement leur lecture difficile. L'inventaire LiDAR met en évidence une forte densité de formes, avec près de 240 km de linéaires anthropiques, dont un tiers correspond à des tranchées militaires, 208 ha d'entités surfaciques, un quart relevant des fortifications Séré de Rivières, plus de 2 200 structures militaires ponctuelles et plus de 24 000 cratères d'obus.

Les morphologies Séré de Rivières couvrent près de 50 ha et représentent près de 1 700 000 m³ de matériaux déplacés, majoritairement exogènes. Elles apparaissent comme des objets standardisés à l'échelle globale comme à l'échelle interne, tout en présentant des singularités marquées et des contrastes d'effacement significatifs entre sites. Les polémoformes de la Première Guerre mondiale totalisent environ 100 km de linéaire et plus de 26 000 entités ponctuelles, dont la distribution et l'organisation spatiale reflètent la position défensive des secteurs et les contraintes géomorphologiques. Enfin, les autres formes archéologiques, notamment les carrières (150 ha cumulés) et les linéaires agro-sylvicoles, témoignent de dynamiques d'usage du sol antérieures, postérieures ou parallèles aux temps militaires.

Ces résultats convergent vers un ensemble réduit de questions structurantes : quels facteurs expliquent les variations géométriques et morphologiques, de même que leurs différents degrés d'effacement et à ce titre, quelles trajectoires ont conduit à leurs états actuels ? Quels rôles ont joué la nature des géomatériaux, leur extraction, les volumes déplacés et les risques géotechniques associés ? Ils invitent également à interroger la provenance de ces matériaux, les interactions avec les formes archéologiques préexistantes, ainsi que les éventuelles réutilisations de sites d'extraction.

Vis-à-vis des polémoformes de la Première Guerre mondiale, les résultats posent d'autres questions : comment la guerre a-t-elle remodelé les reliefs Séré de Rivières, et dans quelle mesure la position des forts a-t-elle influencé l'organisation multiscalaire des réseaux de tranchées et des structures associées et les influence-t-elle toujours ?

Deux dimensions transversales restent enfin ouvertes : en premier lieu, la part des structures souterraines dans la configuration morphologique de surface, et en second lieu, l'influence mutuelle entre la végétation, à la fois contrainte opérationnelle et facteur d'altération ou de préservation des formes, et les morphologies Séré de Rivières, susceptibles de générer des perturbations environnementales.

CHAPITRE 6 : DISCUSSION



Tranchée de la Première Guerre mondiale reconstituée au fort de Montbré (juillet 2025)

6. DISCUSSION

Dans le précédent chapitre, un portrait morphologique et spatial des polémoformes du secteur rémois a permis de mettre en évidence l'influence structurante des fortifications Séré de Rivières dans le palimpseste topographique local. Il montre la diversité des formes environnantes, ainsi que leurs contrastes d'intégrité morphologique et pose la question des interactions complexes entre ces fortifications, les traces de la Première Guerre mondiale et les autres morphologies anthropiques.

Pour l'explorer, cette discussion s'organise dans un premier temps autour de l'étude morphogénétique des fortifications Séré de Rivières, qui a pour objectif de proposer un phasage dans le temps de la construction des morphologies Séré de Rivières et de leurs différentes trajectoires (6.1). Dans un second temps, leur situation est mise en perspective avec d'autres forts et d'autres places, afin d'envisager la représentativité des résultats obtenus dans le secteur de Reims (6.2). Ce dernier chapitre vise ainsi à discuter la portée des résultats de l'approche morphologique appliquée aux forts Séré de Rivières au regard de l'état de l'art, tout en précisant les conditions de leur transférabilité et les principales limites de l'analyse proposée.

6.1. Morphogenèse des formes Séré de Rivières

Cette partie analyse les processus de mise en place, d'évolution et d'effacement des polémoformes Séré de Rivières de Reims, en reconstituant la trajectoire du paysage fortifié depuis sa création. Les fortifications sont ici considérées comme des reliefs anthropiques dont la morphogenèse est étroitement liée à leur fonction défensive. Le discriminant temporel retenu n'est donc pas la Première Guerre mondiale en tant qu'événement, mais la succession des phases durant lesquelles la fonction défensive (active, indirecte, puis désactivée) commande l'évolution des formes (*cf.* partie 1.1.3).

La section 6.1.1 traite de la genèse des reliefs fortifiés au moment de la mise en place de la fortification permanente. La section 6.1.2 examine leur réinscription, variable selon les ouvrages, dans les systèmes défensifs de la Première Guerre mondiale. La section 6.1.3 aborde l'après-guerre et les trajectoires divergentes qui en résultent. La section 6.1.4 met en discussion les héritages environnementaux et patrimoniaux associés à des états de conservation contrastés. Ces différentes analyses mobilisent des approches complémentaires à l'analyse LiDAR afin d'en préciser les apports, tandis que leurs limites sont discutées plus spécifiquement dans la section 6.1.5.

6.1.1. Genèse des reliefs fortifiés (fonction défensive active)

Cette section analyse la phase de création du relief fortifié en examinant dans quelle mesure le contexte géomorphologique, dont la topographie, ainsi que la disponibilité en géomatériaux et en eau, ont modulé la mise en forme des ouvrages, au sein d'un cadre doctrinal fortement standardisé. Elle vise à préciser l'ampleur du bouleversement topographique induit par la construction, la composition matérielle des forts (géomatériaux cohérents et meubles, massifs de terre), ainsi que la part des structures souterraines, dont la lecture échappe en grande partie au LiDAR aéroporté.

6.1.1.1. Volumétrie et géomatériaux

Les résultats présentés en partie 5.2.2 montrent que la construction des forts à massif central de la ceinture de Reims (1875-1885), puis des magasins-cavernes (1892), constitue un événement géomorphologique majeur à l'échelle du Pays rémois. L'essentiel des bouleversements topographiques, étendus sur plus de 50 ha, pour un volume total remanié estimé à près de 1 700 000 m³, se concentre avant 1879 (1 200 000 m³ soit 75 %), dans le cadre de la première tranche de fortification implantée sur les principales buttes-témoins du Pays rémois (fig. 6.1). Cette concentration temporelle coïncide avec l'apogée du Comité de défense (1876-1878), avant les critiques parlementaires de 1879 et l'éviction du général Séré de Rivières (*cf.* partie 2.3.1).

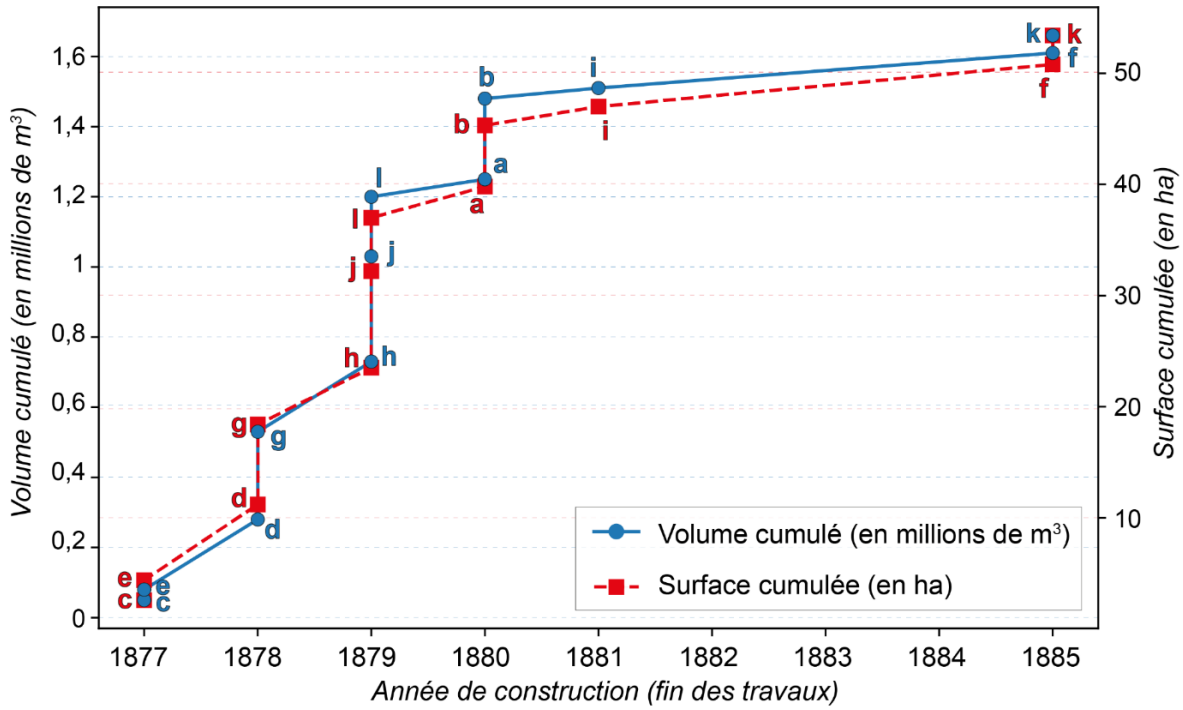


Figure 6.1 : Évolution des surfaces et volumes bouleversés liés à la construction de fortifications Séré de Rivières de Reims. a : Réduit de Chenay ; b : Fort de Saint-Thierry ; c : Batterie de Loivre ; d : Fort de Brimont ; e : Batterie du Cran de Brimont ; f : Fort de Fresne ; g : Fort de Witry-lès-Reims ; h : Batterie de Berru ; i : Vigie de Berru ; j : Fort de Nogent-L'Abbesse ; k : Fort de la Pompelle ; l : Fort de Montbré.

L'estimation des volumes déplacés corrobore le recours massif à des géomatériaux exogènes (*cf.* partie 5.2.2.3), conformément aux principes de la fortification permanente décrits dans les cours du Génie (Simoutre, 1889a). Toutefois, le volume bouleversé de matériaux endogènes est tel que la construction engendre parfois le démantèlement de la couche géologique sommitale, tel qu'à l'emplacement du fort de Montbré, où la butte est initialement coiffée par des épandages de sables à galets de silex (Thanétien ; Laurain et al., 1981 ; fig. 3.2B, 3.5).

Grâce au prélèvement d'échantillons et à l'analyse des macrofaciès lithologiques, il est possible de déterminer plus précisément la nature, la composition et l'origine de ces géomatériaux, cohérents ou meubles (*cf.* partie 4.4.1.2), comme l'illustre l'exemple du fort de Nogent-l'Abbesse. Les relevés de façade du casernement et de la caponnière double présentent une diversité de roches mobilisées, combinée à une pluralité d'usages architecturaux inféodés aux caractéristiques pétrographiques des matériaux, selon des principes analogues à ceux de l'architecture civile contemporaine (fig. 6.2A-D).

Les calcaires bleus ardennais du Givétien (Calcaire noir à *Stringocephalus*), ainsi que les grès quartzitiques exploités en Pays rémois (Thanétien), non représentés sur le relevé de façade, sont des roches dures et très peu perméables. Ils sont respectivement employés en bordure de trottoir, comprenant les avaloirs du réseau de récupération des eaux de pluie, et en revêtement des caniveaux.

Les calcaires plus tendres, qui se taillent plus facilement, correspondent aux calcaires du Lutétien, approvisionnés dans des périmètres locaux et régionaux (Aisne), et aux calcaires à entroques oxfordiens de type Euville (pierre d'Euville). Ils composent notamment les encadrements et les éléments architecturaux nécessitant la mise en œuvre soignée de pierres de taille. Les premiers sont ainsi utilisés sur la façade du casernement, en jambage et en linteau sous forme d'arc surbaissé entourant les baies, et sont largement utilisés sous forme de moellons pour l'élévation des murs intérieurs des substructures. Les seconds, impliquant une aire d'approvisionnement extrarégionale (Hauts-de-Meuse, district carrier entre Verdun et Commercy), sont privilégiés pour les éléments architectoniques transversaux de cette même façade (bandeau de soubassement, appuis, bandeau supérieur, corniche) et pour les encadrements de la caponnière double.

La meulière, plus hétérogène et généralement cariée de vacuoles typiques du district de la Brie champenoise, est cantonnée à des usages compatibles avec un débitage irrégulier, car elle est trop difficile à tailler. Elle est utilisée en élévation extérieure sur les deux structures, sous la forme d'un appareil en moellons de meulière irréguliers, posés à plat et présentés en parement de face, assimilable à un *opus incertum* tardif, avec un module toutefois plus

restreint pour la caponnière double. Elle peut également être employée en élévation intérieure des maçonneries des salles, ou extérieure (*e.g.*, mur de soutènement du parapet).

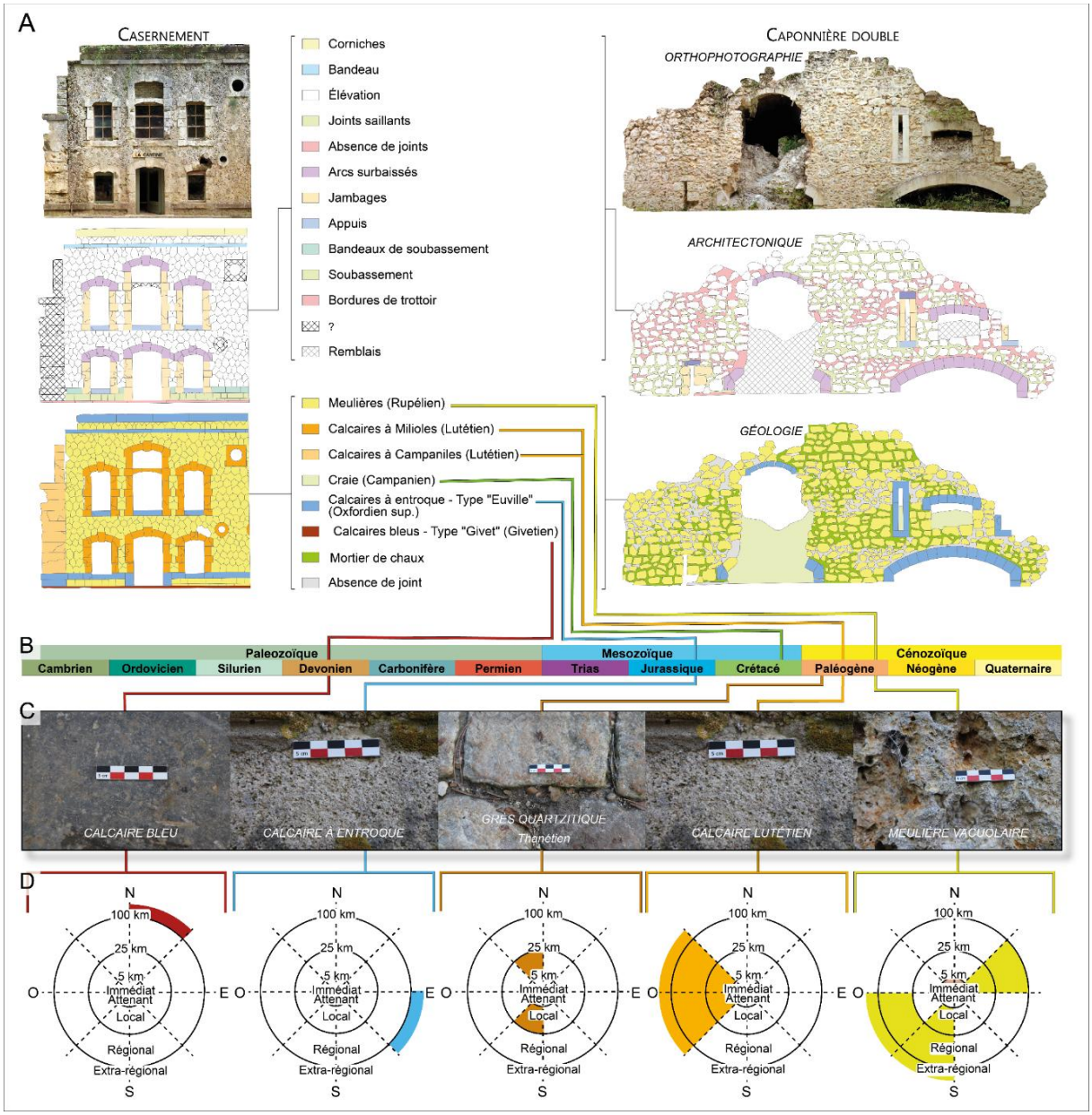


Figure 6.2 : Géomatériaux cohérents utilisés pour la construction du fort de Nogent-l'Abbesse. A : Relevés des façades du casernement et de la caponnière double (source des orthophotographies : photogrammétrie réalisée par Sébastien Laratte) ; B : Ères et périodes géologiques ; C : Photographie des macrofaciès ; D : Diagramme de provenance.

Dans une moindre mesure, les géomatériaux meubles, principalement sables, argiles et marnes, sont mobilisés pour la fabrication des mortiers et des terres cuites architecturales, telles que les briques utilisées pour les planchers en voûte ou les tuiles utilisées pour les dispositifs de récupération des eaux pluviales. Ils sont également en grande partie employés dans la constitution du massif de terre utilisé pour le blindage des substructures. Bien

qu'aucune caractérisation exhaustive n'ait été réalisée, la richesse des niveaux argileux des formations paléogènes affleurantes en Pays rémois et les nombreuses carrières (*cf.* partie 5.4.1) suggèrent une exploitation pouvant être locale.

La comparaison avec les forts de Reims les mieux conservés (groupe G2 et batterie de Berru ; *cf.* partie 5.2.2), suggère que le fort de Nogent-l'Abbesse présente un corpus de géomatériaux du bâti représentant les roches les plus fréquemment employées (tab. 6.1). Cette fréquence d'emploi s'explique par une disponibilité géologique mise en valeur au sein de districts carriers et de réseaux d'approvisionnement bien établis, tant au sein de périmètres locaux (sables, argiles, grès quartzitiques), tel que suggéré par l'atlas de Poinsignon (fig. 3.38) ou l'inventaire LiDAR des carrières (*cf.* partie 5.4.1.2), que régionaux (*e.g.*, meulière vacuolaire, calcaires à milioles, à campaniles) ou extrarégionaux (calcaires bleus de type Givet, calcaire à entroques de type Euville).

Descr. niv. 1	Descr. niv. 2	Étage géol.	Type de pierre	Fort	Type d'emploi dominant observé
Meulière	vacuolaire	Rupélien	Brie champenoise	a, b, d, h, j, k, l	parement, voûte, mur de soutenement, fourrure
Meulière	massive	Rupélien	Tardenois-Montagnede Reims		élévation intérieure, fourrure
Calcaire	à Milioles	Lutétien	/	a, b, h, j, k	encadrement, soubassement, escalier, fourrure
Calcaire	à Campaniles	Lutétien	/		
Calcaire	à Ditrupa	Lutétien	/		
Calcaire	coquiller grossier	Lutétien	/		
Grès	quartzitique	Thanétien	/	l, j	pavé
Calcarénite	/	Thanétien	/	d	élevation intérieure
Calcaire	à entroques	Oxfordien sup.	Euville	a, b, j, k, l	encadrement, soubassement, escalier
Calcaire	marbrier bleu	Givetien	Givet	b, j, k, l	bordure de trottoir, pierre d'eau
Calcaire	bioclastique	Bajocien inf.	Dom-le-Mesnil	b, d,k	élevation, soutènement, voûte, fourrure
Calcaire	oolithique vacuolaire	Tithonien	Savonnière	b, k	corniche, encadrement
Calcaire	oobioclastique	Oxfordien	Semuy-Neuville-Day	l	élévation intérieure
Basalte	/	/	/	b	escalier
Craie	Craie blanche	Campanien	/	d, j	jointage, fourrure, terrassement

Tableau 6.1 : Géomatériaux cohérents selon la nature géologique (fig. 3.2B, 3.4) et les types d'emploi observés. a : Réduit de Chenay ; b : Fort de Saint-Thierry ; d : Fort de Brimont ; h : Batterie de Berru ; j : Fort de Nogent-l'Abbesse ; k : Fort de la Pompelle ; l : Fort de Montbré.

Cet approvisionnement multiscalaire traduit ainsi la diversification des géomatériaux de construction locaux historiquement contraints par la géologie et le caractère non navigable de la Vesle, sous l'impulsion du développement concomitant des canaux de navigation de type Freycinet et surtout du chemin de fer au milieu du XIXe siècle (annexe 22 ; Fronteau et al., 2014 ; Laratte, 2022b).

Selon la même logique, la synthèse des géomatériaux cohérents révèle un répertoire lithologique encore plus diversifié à l'échelle de la ceinture, avec le recours à un spectre étendu de pierres couramment utilisées dans l'est du Bassin parisien (fig. 6.3 ; tab. 6.1).

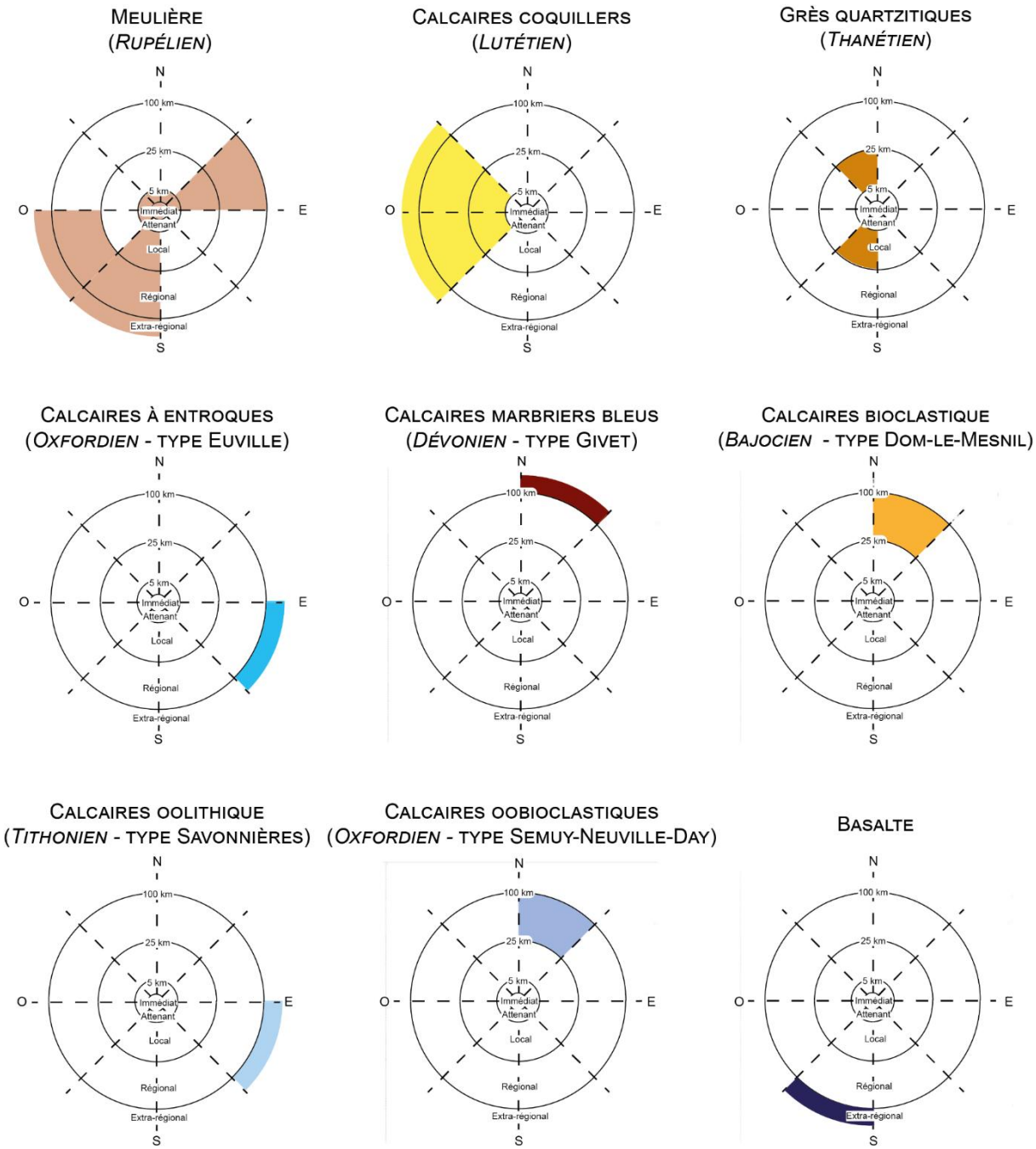


Figure 6.3 : Diagramme de provenance des géomatériaux de construction cohérents recensés dans les forts de Reims.

Il s'agit notamment de calcaires bioclastiques de type Dom-le-Mesnil (Bajocien inférieur) et oobioclastiques de type Semuy-Neuville-Day (Oxfordien), surtout utilisés en élévation et des calcaires oolithique vacuolaire de type Savonnières (Tithonien) utilisés en encadrement ou en corniche, tel qu'au fort de la Pompelle (annexe 52). L'emploi de basalte pour les escaliers de fond du casernement du fort de Saint-Thierry constitue une exception notable (annexe 53A-B). Ce choix s'explique vraisemblablement en partie par les propriétés mécaniques particulières de cette roche, caractérisée par une résistance élevée à l'abrasion et à la compression, ainsi que par une rugosité favorable à une circulation sûre dans des

espaces humides et fortement sollicités (Yilmaz, 2022). Une hypothèse complémentaire peut être avancée, tenant à l'existence d'une opportunité d'approvisionnement spécifique au moment de la construction, liée au réseau commercial et logistique de l'entrepreneur chargé de l'édification du fort.

Dans l'ensemble, outre leur disponibilité, les critères majoritaires ressortant dans le choix des matériaux géologiques cohérents semblent être leur résistance à l'altération (gel, humidité, altération) et leur comportement hydraulique, que ce soit vis-à-vis de la gestion des écoulements ou des transferts d'eau (*e.g.*, remontée par capillarité). Un critère d'esthétisme émerge également par l'emploi de pierres ornementales (non évoquées ici), une recherche d'uniformité colorimétrique et texturale et le soin apporté aux parements (Laratte, 2024), rappelant ainsi cette proximité architecturale avec les bâtiments civils et religieux, dont les forts Séré de Rivières de type 1874 en sont les derniers exemples dans l'histoire de la fortification française (Rocolle, 1973).

Les massifs de terre mobilisent pour leur part un assemblage complexe de géomatériaux remaniés, dont le comportement est mécaniquement meuble au sens géotechnique, indépendamment de leur nature lithologique. Une coupe visible depuis le fossé de gorge du fort de Saint-Thierry révèle une couche basale vouée à répartir la charge au-dessus des substructures, constituée d'un ensemble de blocs décimétriques de calcaires lutétiens, liés par un mortier de chaux, formant un léger creux à la jonction des voûtes afin de permettre l'évacuation de l'eau (fig. 6.4A-B). Le drainage est assuré par une couche bitumineuse étanchéifiante recouvrant ce niveau basal, canalisant l'écoulement de l'eau au sein des matériaux sus-jacents. Au-dessus, l'essentiel du volume est composé d'un remblai présentant une granulométrie de bas en haut, avec un hérisson de blocs décacentimétriques servant d'assise à un remplissage s'affinant progressivement, favorisant le drainage vers les niveaux inférieurs et optimisant la stabilité mécanique. Il laisse place à une couche de terre végétale dont le rôle secondaire de protection superficielle est complété par un rôle de régulation hydrique et de support à la végétation (*cf.* partie 6.1.1.2). Ces volumes de géomatériaux, désignés jusque-là comme des massifs de terre, suggérant un remplissage opportuniste, constituent ainsi en réalité des dispositifs techniques rocheux stratifiés.

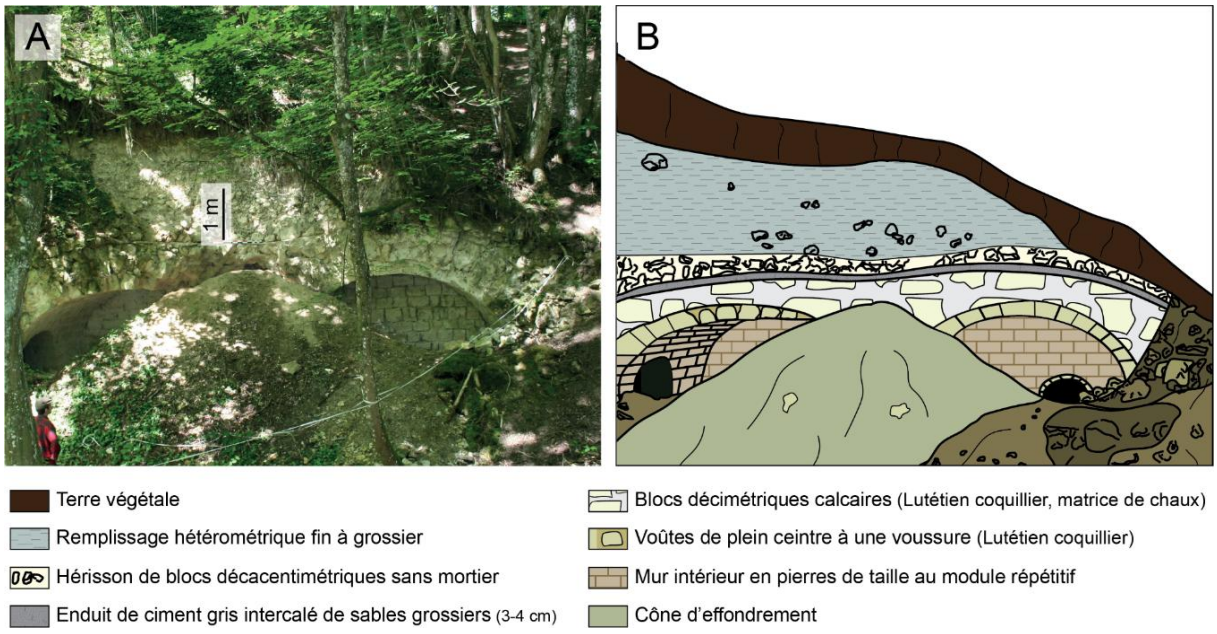


Figure 6.4 : Coupe du remblai utilisé pour le massif central du fort de Saint-Thierry. A : Photographie horizontale (cl : Alain Devos, 12 juin 2024) ; B : Description de la coupe depuis le fossé oriental (front de gorge).

L'utilisation exploratoire d'un LiDAR mobile terrestre au fort de Montbré (*cf.* partie 4.4.1.2), combinée aux données LIDAR HD aéroportées, permet d'estimer la part relative du massif de remblais par rapport aux substructures maçonnées et d'appréhender plus finement la dimension souterraine de l'ouvrage (fig. 6.5). Les résultats mettent en évidence une épaisseur de la masse couvrante atteignant généralement 5 à 6 m, largement supérieure au volume occupé par les galeries au droit de l'acquisition. Cette prédominance volumétrique du remblai explique le caractère fondamentalement hybride des forts Séré de Rivières, à la fois ouvrages bâtis et reliefs artificiels, dont la matérialité autorise aujourd'hui une continuité morphologique et écologique avec l'environnement topographique environnant, jusqu'à permettre l'installation d'un couvert forestier pérenne (*cf.* partie 3.1.5.3 ; fig. 3.22A-B, D, H-L).

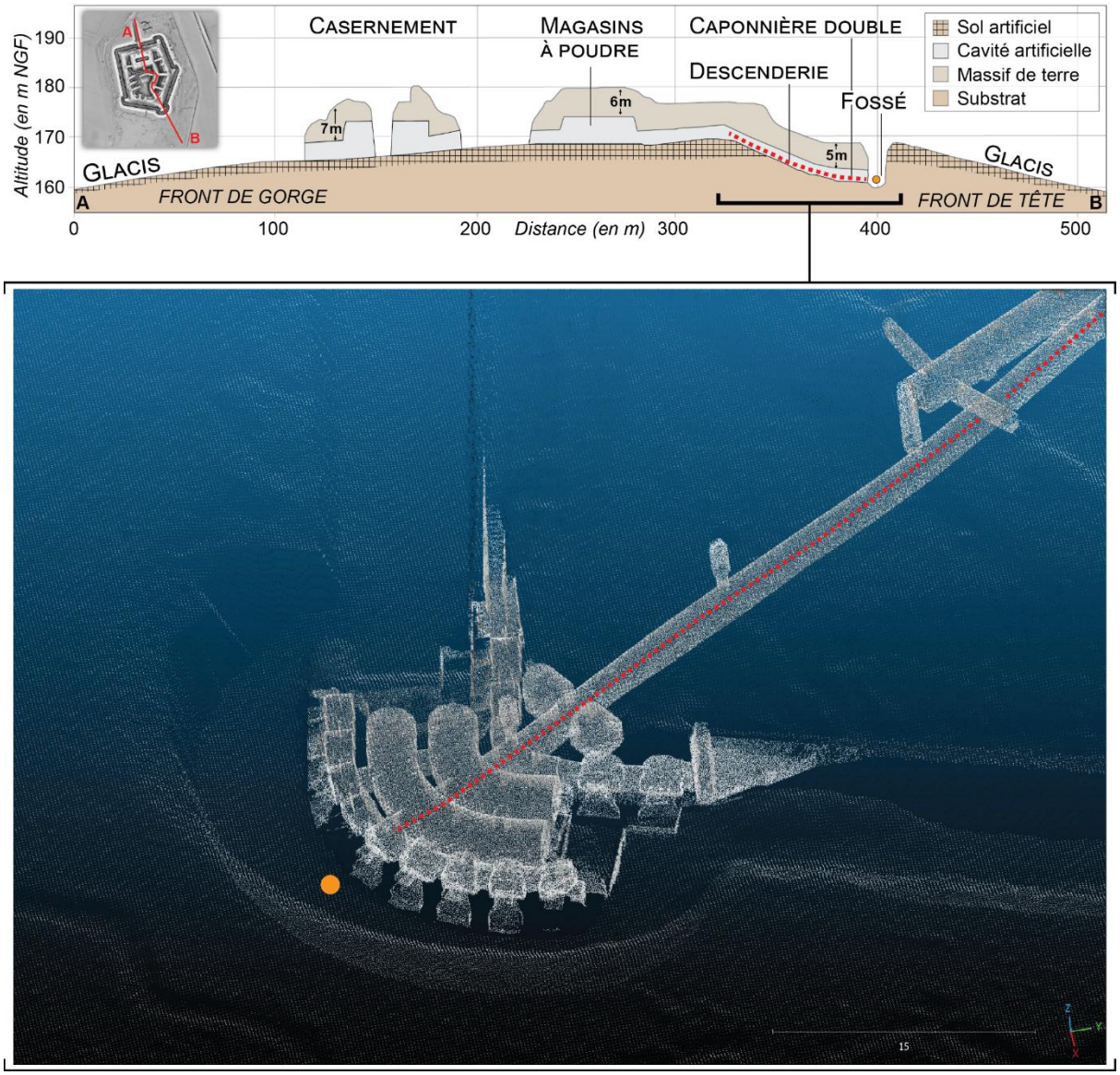


Figure 6.5 : Coupe topographique du fort de Montbré et vue en 2,5D de la caponnière double de tête, réalisées via des données LiDAR aéroportées (LIDAR HD, 2023, IGN) et des relevés LiDAR terrestres.

Finalement, l'emploi raisonné des géomatériaux dans les forts de Reims répond aux critères fonctionnels énoncés par Fronteau et al. (2014), relevant à la fois de l'ouvrabilité (facilité de de mise en œuvre), de l'efficacité (capacité à produire un effet recherche) et de la durabilité des ouvrages (capacité de résistance). Les géomatériaux maçonnés participent surtout à la pérennité structurelle, tandis que la protection balistique est principalement assurée par la géométrie de l'ouvrage combinée au blindage en terre. Le massif de terre est ainsi voué à absorber et dissiper l'énergie des tirs ennemis jusqu'en 1886, date à laquelle l'entérinement de son inefficacité (par la suite relativisée) entraîne la construction des deux magasins-sous-roc (1892 ; fig. 5.58A-C).

Ce dispositif technique est complété par la réalisation d'un génie végétal rationalisant l'usage de plantations militaires dont les implications défensives et morphologiques sont abordées dans la section suivante. Cette « ouverture » aux géomatériaux des forts qui s'intéresse aux « formations » des morphologies pour le géomorphologue montre également les limites de l'approche LiDAR aéroportée qui se cantonne aux formes de surface.

6.1.1.2. Plantations militaires

L'hybridation entre relief préexistant, structures, maçonnées ou non et massifs de terre, caractérisant les fortifications Séré de Rivières de type 1874, est prolongée par le recours au génie végétal, tel qu'il est théorisé dans l'instruction de 1877 (*cf.* partie 2.4.2 ; fig. 2.21 ; tab. 2.2). Son étude permet d'envisager les incidences paysagères et morphologiques des plantations militaires. Dans le secteur rémois, cette pratique a pu être documentée par le croisement de photographies aériennes et horizontales anciennes (fig. 6.6A-C, 6.7AB, 6.8) et d'indices biogéographiques observés sur le terrain (fig. 6.9A-B).

Au fort de Brimont, des photographies datant de 1913 (exercice de mines ; fig. 6.6A-B) et de 1917 (fig. 6.6C) révèlent l'existence d'arbres implantés sur le glacis dont la hauteur décamétrique atteste d'une plantation antérieure de plusieurs décennies. Les clichés de 1913 suggèrent l'emploi d'essences feuillues disposées de manière à constituer une barrière végétale en avant de l'ouvrage. Le port élancé et la morphologie des houppiers évoquent des espèces telles que le hêtre (*Fagus sylvatica*) ou le peuplier tremble (*Populus tremula*), cette dernière présentant par ailleurs des caractéristiques fonctionnelles recherchées, telles qu'une croissance rapide et des racines traçantes susceptibles de compliquer les travaux de sape (Simoutre, 1889a). L'absence de données botaniques directes et le biais induit par l'élagage des branches basses ne permettent toutefois pas d'aboutir à une identification certaine.

De manière comparable, aux forts de Witry-lès-Reims (fig. 6.7A) et devant la batterie sud-ouest du fort de Nogent-l'Abbesse (fig. 6.7B), des photographies aériennes datant de 1915 présentent un glacis occupé par plusieurs rangées d'arbres. La forme conique des houppiers et leur signature spectrale suggèrent plutôt ici une plantation de résineux, hypothèse corroborée par la présence actuelle de pinèdes bien caractérisées en avant de la batterie (*Pinus sylvestris*, *Pinus nigra*).

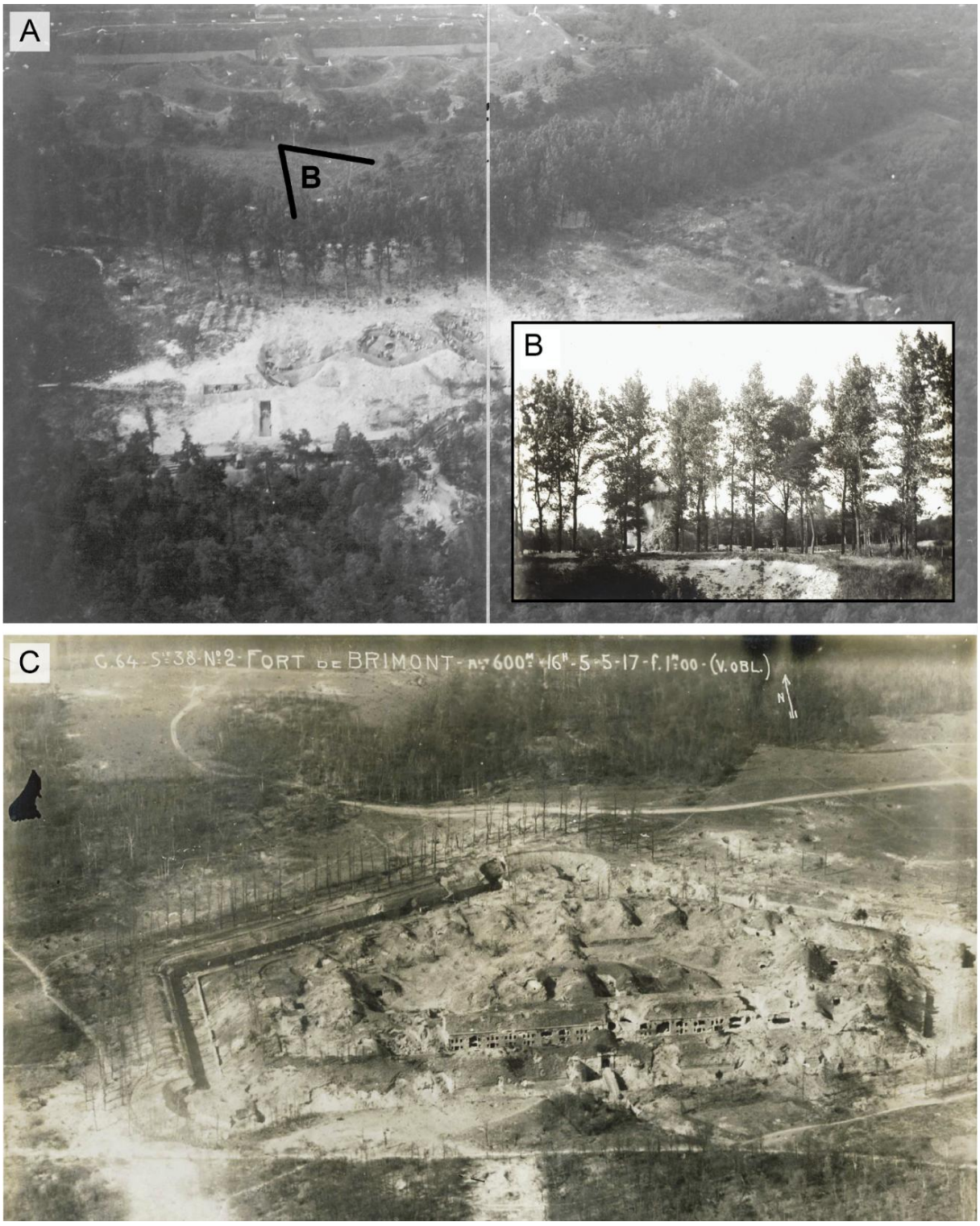


Figure 6.6 : Photographies du fort de Brimont attestant de la présence d'arbres disposés en quinconce sur le glacis. A : aérienne oblique, 8 août 1913 à 7 h 30 (SHD, GR 2 V 120) ; B : horizontale, été 1913 (SHD, GR 2 V 120) ; C : aérienne oblique, 5 mai 1917 à 16 h (fonds Fouqueray).

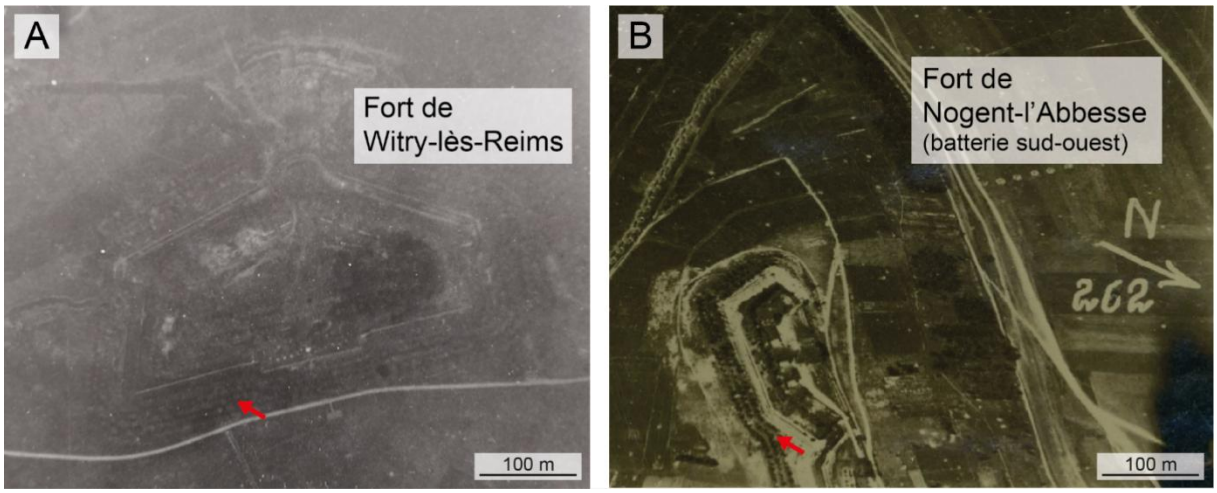


Figure 6.7 : Plantations résineuses du glacis révélées par des photographies aériennes militaires de 1915. A : Fort de Witry-lès-Reims (SHD, AI 1 A 354-3) ; B : Batterie sud-ouest du fort de Nogent-l'Abbesse (GAK, 456 F 86 n174).

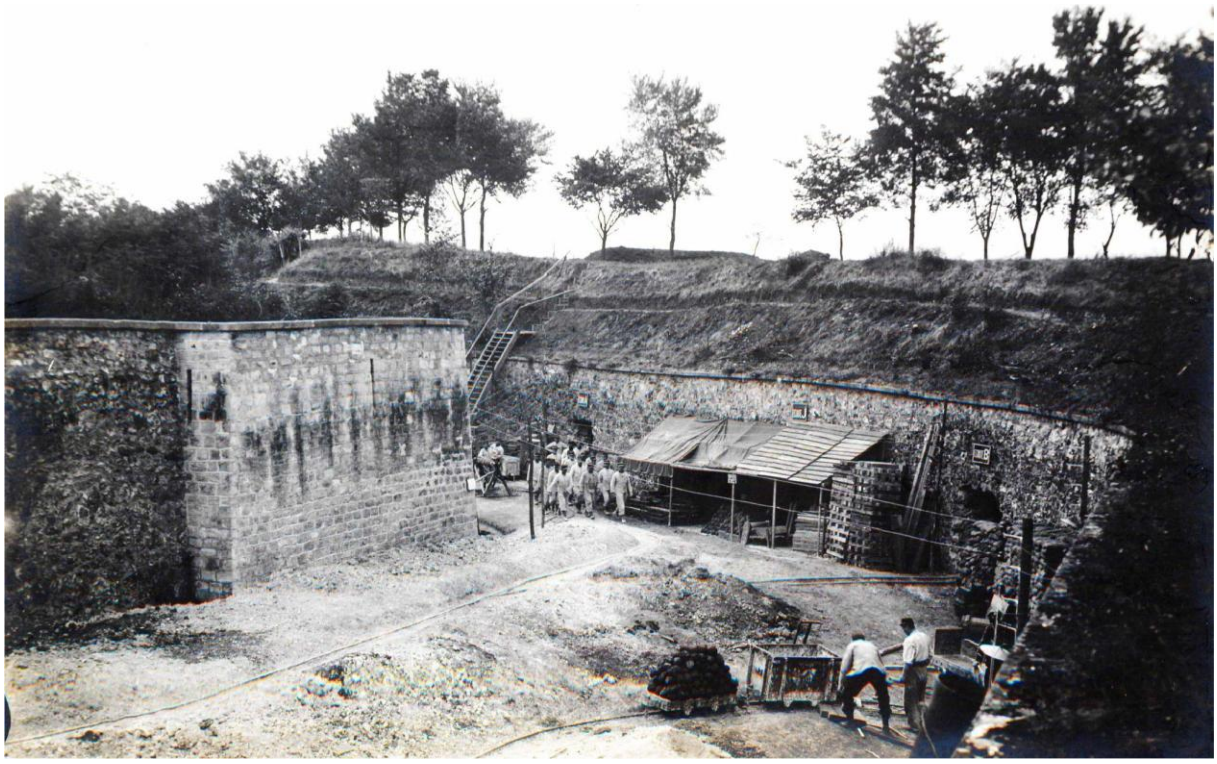


Figure 6.8 : Fossé du fort de Witry-lès-Reims en 1912 (SHD, GR 2 V 120).

Sur le glacis du réduit de Chenay, enfin, le relevé botanique a permis de caractériser des alignements de marronniers disposés parallèlement aux faces droites et de tête du fossé, qui interpellent par leur régularité spatiale (fig. 6.9A-B). Leur diamètre, pluridécimétrique à métrique, témoigne d'une ancienneté certaine, qu'il conviendrait néanmoins de préciser par des méthodes dédiées (*e.g.*, dendrochronologie) afin de confirmer l'hypothèse d'une plantation d'origine militaire.

Ailleurs sur les forts, les indices photographiques sont plus ténus du fait de l'emploi d'une végétation surtout arbustive, notamment sur les talus extérieurs, afin d'augmenter la résistance aux projectiles (Simoutre, 1889a). Une photographie prise lors d'exercices de mines au fort de Witry-lès-Reims en 1912 met justement en évidence, outre des arbres au sommet du rempart, une végétation herbacée et buissonnante sur les talus, limitant l'érosion des massifs (fig. 6.8). Au fort de Brimont, les archives mentionnent tout de même la présence d'arbres feuillus implantés sur la plongée, au sommet des parapets, afin de masquer le massif central et les échancrures créées par les traverses (fig. 6.6A).

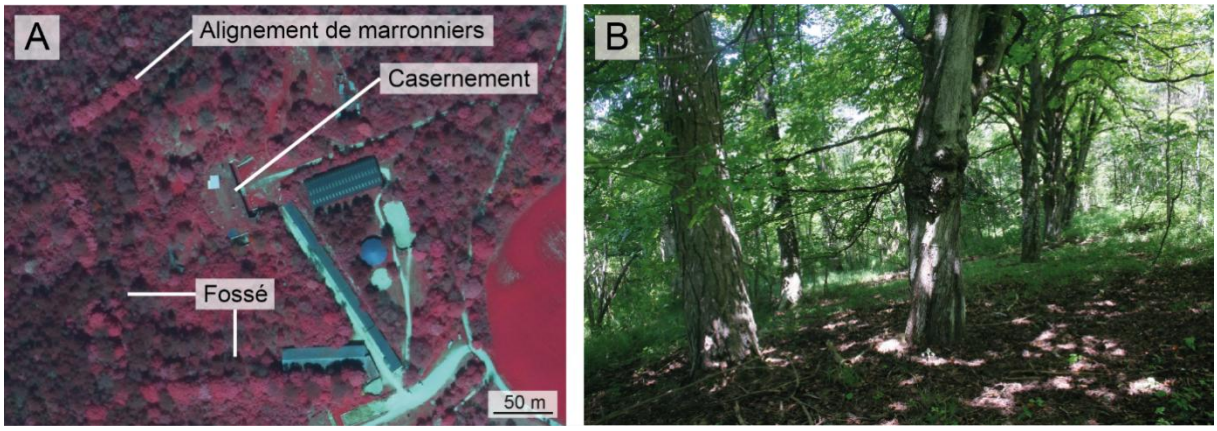


Figure 6.9 : Alignement de marronniers sur le glacis du réduit de Chenay révélé par la photographie aérienne et la prospection pédestre. A : Photographie aérienne infrarouge couleur (2022, IGN) ; B : Marronniers sur le glacis (cl : Alain Devos ; juin 2023).

En définitive, si tous ces exemples ne constituent pas des preuves de l'emploi de génie végétal, renseignant en premier lieu sur la présence de végétation au début du XXe siècle, la présence d'arbres relativement âgés sur le glacis corrobore cette hypothèse avec un haut degré de confiance. Conçu dès la phase de construction comme un dispositif fonctionnel des ouvrages, le recours au génie végétal ne se limite ainsi pas à un accompagnement paysager. Par ses effets attendus sur la stabilité des talus et la dissimulation des formes, il est susceptible de contribuer à la modulation des processus géomorphologiques ultérieurs (*cf.* partie 6.1.3), sans que son rôle puisse être isolé des autres facteurs environnementaux et anthropiques. Son utilisation pour stabiliser les formations des forts et limiter l'érosion ou les mouvements de masse, s'inscrit dans une prise de conscience nationale de ces enjeux à la fin du XIXe siècle avec la restauration des terrains en montagne (RTM), et les grands programmes de plantation après des déboisements inconsidérés et des inondations majeures (Ogé, 1988).

L'examen des modalités de construction, des géomatériaux mobilisés et du recours au génie végétal confirme la forte cohérence d'ensemble dans la mise en forme des forts, déjà révélée dans l'analyse morphologique (*cf.* partie 5.2). Cette homogénéité, largement héritée de

prescriptions doctrinales, n'exclut toutefois pas des ajustements locaux, qui invitent à interroger le rôle des paramètres environnementaux dans la modulation des formes initiales.

6.1.1.3. Facteurs explicatifs

La contextualisation géomorphologique a permis de montrer l'influence des reliefs associées à la cuesta d'Île-de-France sur l'organisation spatiale des forts autour de Reims (*cf.* partie 3.1.2). Les résultats ont, par ailleurs, mis en évidence une forte standardisation des formes globales, principalement héritée des choix doctrinaux et des prescriptions officielles encadrant la fortification permanente (*cf.* parties 2.3, 2.4 et 3.2.3.1). Dans ce cadre environnemental contraint, les grandes caractéristiques morphologiques et morphométriques des ouvrages sont ici confrontées aux paramètres géomorphologiques et géologiques, afin d'évaluer dans quelle mesure ils ont modulé, localement, la mise en œuvre des principes notamment énoncés dans l'instruction du 9 mai 1874 et contribué aux variations morphologiques observées.

Le conditionnement géomorphologique s'exprime notamment dans la topographie environnant les forts, dont la plupart semblent, dans une certaine mesure, épouser la structure des interfluves sous-jacents. Plusieurs cas illustrent une certaine adaptation morphologique, comme le révèle la combinaison du MNT avec un indice de pente (fig. 6.10A-L) ou d'un indice de position topographique (fig. 6.11) :

- (i) le quadrilatère subtriangulaire du fort de Saint-Thierry, dont les deux faces du front de tête accompagnent le rétrécissement du plateau des calcaires lutétiens vers l'ouest (fig. 6.10B) tout comme le réduit de Chenay qui épouse une terminaison méridionale du Massif de Saint Thierry (fig.6.10A) ;
- (ii) le plan concave subtrapézoïdal de la batterie de Berru, dont les faces de flanc et de tête correspondent à l'extension d'un replat structural de l'Yprésien supérieur (fig. 6.10H, fig. 6.11) ;
- (iii) les batteries latérales du fort de Brimont (fig. 6.10C, E), disposées sur les flancs de la butte éponyme, inscrites dans une croupe crayeuse et un replat de calcarénites thanétiennes (Devos et al., 2019b) ;
- (iv) la vigie de Berru, dont le plan pentagonal compact s'insère au sommet d'une motte sommitale sculptée dans un lambeau de marnes bartoniennes ou ludiennes (fig. 6.10I, fig. 6.11) ;
- (v) les structures du fort de Nogent-l'Abbesse et de ses batteries, qui s'ajustent aux contours de la croupe qu'elles occupent (fig. 6.10J, fig. 6.11) ;
- (vi) enfin, le fort de la Pompelle, dont l'implantation suit l'orientation du glacis de raccordement dégagé dans la craie sur lequel il est construit (fig. 6.10K).

Le cas de la batterie de Loivre, dont les documents contemporains à la construction attestent d'un remodelage de sa croupe crayeuse, illustre toutefois, au même titre que l'ampleur des volumes bouleversés (fig. 6.1), les lourdes modifications paysagères que le Génie est susceptible de réaliser à des fins militaires (fig. 5.18A-D).

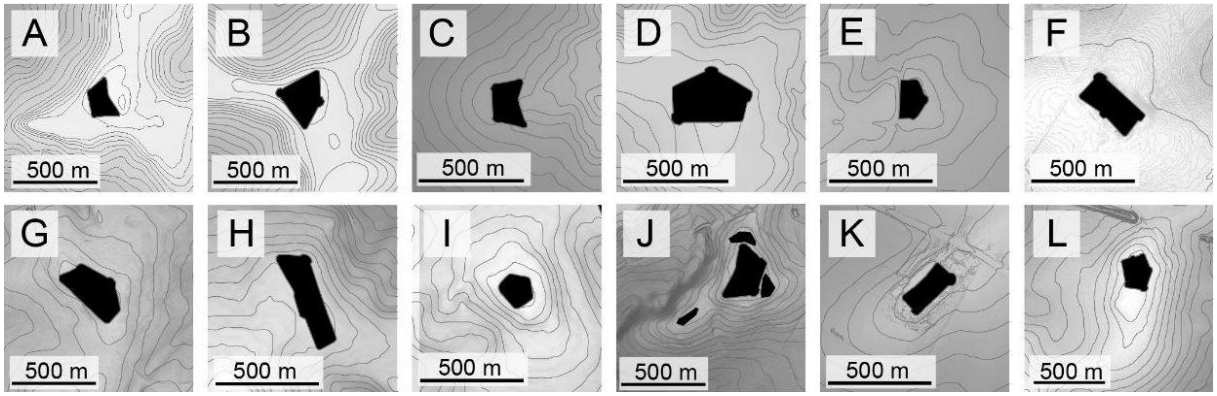


Figure 6.10 : Topographie des sites de construction des forts de Reims. A : Réduit de Chenay ; B : Fort de Saint-Thierry ; C : Batterie de Loivre ; D : Fort de Brimont ; E : Batterie du Cran de Brimont ; F : Fort de Fresne ; G : Fort de Witry-lès-Reims ; H : Batterie de Berru ; I : Vigie de Berru ; J : Fort de Nogent-l'Abbesse ; K : Fort de la Pompelle ; L : Fort de Montbré.

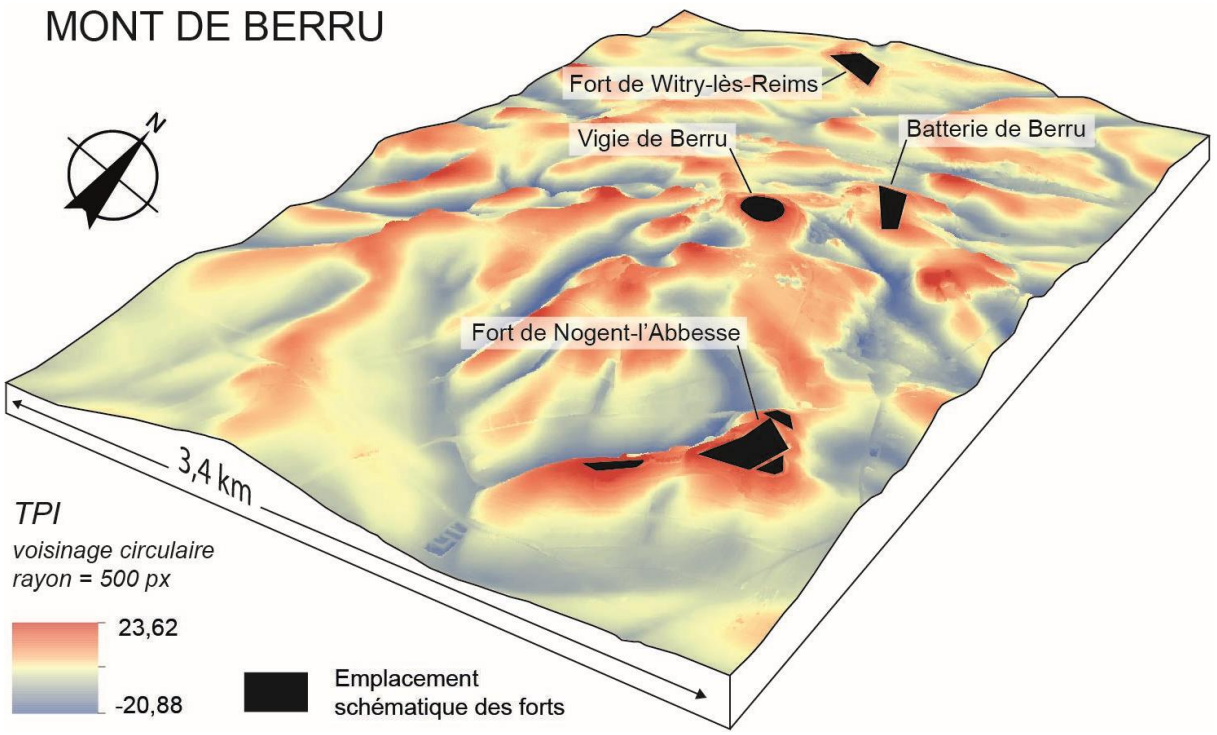


Figure 6.11 : Positionnement des forts du Mont de Berru par rapport à leur environnement topographique (données : LiDAR IMPACT 14-18).

Au-delà de la forme globale, une dissymétrie entre le front de tête et le front de gorge est généralement recherchée pour mieux défiler les structures d'intendance (fig. 5.31A-F). En

outre, une dissymétrie cette fois-ci transversale peut être induite par la topographie initiale, lorsque celle-ci n'a pas été entièrement terrassée. La batterie de Berru en offre une illustration claire puisqu'un dénivelé de 6 m s'observe en coupe entre la rue du rempart et le fossé des deux flancs (fig. 5.21A-B).

L'influence de la géologie apparaît, pour sa part, davantage dans la dimension verticale des ouvrages. Il s'agit déjà, comme énoncé précédemment, de la disponibilité géologique qui favorise l'emploi de certains géomatériaux (calcaires lutétiens, pavés quartzitiques, meulière), sans pour autant suffire à expliquer tous les choix opérés, qui dépendent aussi des filières d'approvisionnement et des contraintes de chantier (*cf.* partie 6.1.1). Elle s'exprime également dans la morphologie. Néanmoins, son interprétation demeure ambiguë, car si elle s'exerce indéniablement pendant la phase de conception et de construction, elle pèse également au cours de l'évolution postérieure des forts, ce que le LiDAR permet difficilement de discriminer avec certitude.

Les cas contrastés de Nogent-l'Abbesse et de Saint-Thierry, respectivement classés par le Génie du XIXe siècle parmi les « *terrains argileux* » et les « *terrains rocheux* » (Simoutre, 1889a), illustrent bien cette difficulté.

Dans les terrains argileux, la prévention des mouvements de terrain constitue un principe explicite de conception. Elle se traduit au fort de Nogent-l'Abbesse par des dispositifs spécifiques, tels que l'emploi de murs d'escarpe détachés et d'arceaux de décharge dans les maçonneries du fossé (fig. 5.38C, 5.40), mais également par la réalisation de pentes adoucies dans les talus. Pour cette dernière caractéristique, les morphologies observées aujourd'hui au LiDAR ne permettent pas, néanmoins, de distinguer de manière évidente ce qui relève des choix initiaux d'ingénierie de ce qui résulte de déformations secondaires liées au comportement géomécanique des argiles (*cf.* partie 6.1.3.6).

À l'inverse, les terrains rocheux sont théoriquement considérés comme favorables à la stabilité des ouvrages, autorisant des profils plus abrupts et un recours limité à la maçonnerie. Au fort de Saint-Thierry, la bonne qualité des calcaires lutétiens (faciès tendre beige clair coquillier) a constitué un atout majeur, permettant à la fois l'appui direct de certaines maçonneries sur le substrat (fig. 5.42A-C) et la réutilisation des matériaux extraits lors du creusement des fossés pour la construction des substructures et des remblais (fig. 6.4A-B).

Toutefois, l'existence de carrières antérieures à l'implantation de l'ouvrage (fig. 3.36) complique également l'interprétation morphologique actuelle, dans la mesure où elle rend incertaine la part respective de la roche en place et des volumes déjà remaniés au moment

de la construction. Ce contexte limite la possibilité de relier directement les profils observés aujourd'hui à une configuration géologique initiale supposée intacte.

En complément des paramètres géomorphologiques et géologiques, le contexte hydrogéologique intervient également, dans une moindre mesure, notamment en ce qui concerne les stratégies d'alimentation en eau potable (*cf.* partie 3.1.4.2). Dans le secteur rémois, les conditions de sédimentation paléogènes ont engendré une organisation hydrogéologique complexe, à l'origine de réponses techniques différenciées selon les ouvrages (tab. 3.1). La plupart de ces dispositifs restent cependant peu ou pas lisibles dans les données LiDAR, car ils sont enfouis ou intégrés aux maçonneries, comme les citernes et les conduits d'évacuation, ou masqués par le massif de terre, à l'image des puits généralement implantés dans des casemates à l'épreuve. En revanche, le recours à des dispositifs artificiels comme sources principales ou complémentaires d'alimentation peut parfois générer des formes morphogènes identifiables, comme l'illustre la trace de la source Rouby à proximité de la batterie de Berru (fig. 5.61A-C).

Ces analyses confirment, ainsi, que les contraintes environnementales influencent la morphologie des forts sans toutefois la déterminer entièrement. Philippe Truttmann (2017) énonce à ce titre que « *si souvent, les plans sont des polygones réguliers ou, du moins symétriques par rapport à la capitale [(i.e., la galerie centrale)], il est très fréquent que les contraintes du terrain aient imposé des distorsions, asymétries et irrégularités diverses : on fait d'abord de la fortification, et non de la géométrie* ». Les facteurs environnementaux apparaissent donc davantage comme un ensemble de potentialités exploitées par le Génie que comme des déterminants morphologiques stricts, leur lecture étant en partie brouillée par les remaniements liés à la construction elle-même.

Néanmoins, le bouleversement topographique, induit par la mise en place de la ceinture fortifiée, ne se limite pas aux ouvrages fortifiés *stricto sensu*. Ils impliquent également la création de morphologies annexes abordées dans la section suivante.

6.1.1.4. Polémoformes indirectes

La création des fortifications Séré de Rivières s'accompagne d'aménagements annexes liés au chantier (circulation, infrastructures temporaires) et d'activités extractives nécessaires à l'approvisionnement en géomatériaux (*cf.* partie 5.4.1). Ces formes constituent des polémoformes indirectes, au sens où elles ne relèvent ni de l'ouvrage défensif *stricto sensu* ni des combats menés sur le champ de bataille du Pays rémois.

Sur le Mont de Berru, l'organisation du chantier inclut une voie ferrée étroite temporaire attestée par un plan du Génie (1877 ; fig. 3.47), dont des archives judiciaires permettent de

préciser localement l'emprise du remblai. La trace résiduelle, faiblement perceptible sur le LRM, se traduit aujourd'hui par un bombement topographique peu marqué (50 cm de hauteur) mais étendu sur plusieurs dizaines de mètres de largeur (fig. 6.12A-C).

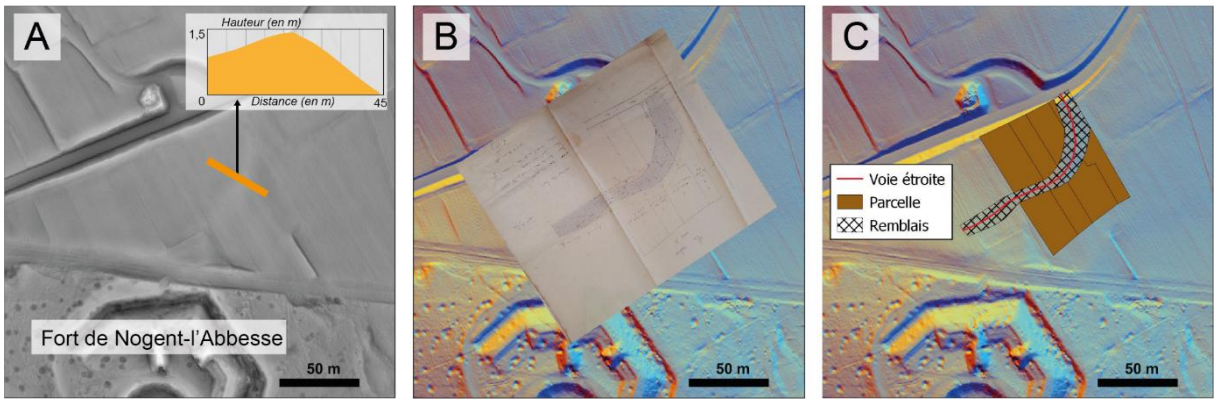


Figure 6.12 : Traces de la voie ferrée étroite du Mont de Berru créée par l'entrepreneur Lancesseur (traitement LRM du MNT LiDAR IMPACT 14-18, GEGENA). A : Signature morphologique et coupe topographique ; B : Géoréférencement du plan correspondant (AD51, 2 U 733 ; traitement ombrage multidirectionnel) ; C : Digitalisation du plan (traitement ombrage multidirectionnel).

Sur la butte de Brimont, une anomalie rectiligne de grande extension (*c.* 600 m), à pente régulière d'environ 5 %, figurée sur les plans directeurs de tir des GCTA, suggère un plan incliné destiné à l'acheminement des matériaux vers le sommet, selon un dispositif déjà décrit pour d'autres chantiers de fortification (fig. 5.117A-B ; Truttmann, 2017). Le plan du Génie mentionne en outre un groupe de bâtiments au sud du fort, compatible avec un aménagement temporaire de chantier (fig. 6.13A-B), pour lesquels aucune empreinte topographique n'a été caractérisée à partir des données LiDAR.

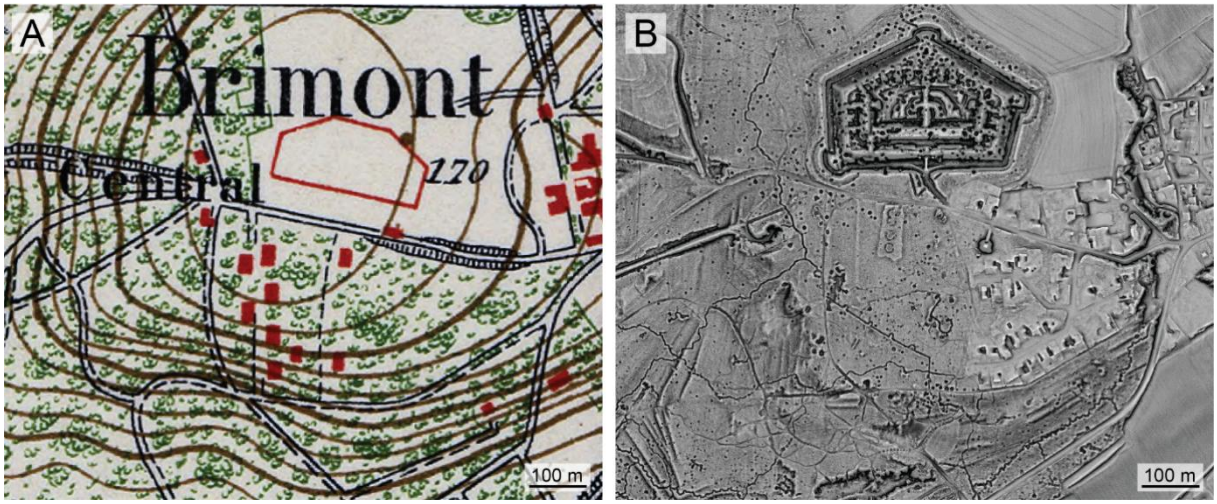


Figure 6.13 : Bâtiments temporaires supposément créés pour la construction du fort de Brimont. A : Plan du Génie de 1879 (SHD, GR 1 V H 2141) ; MNT LiDAR HD (2023, IGN) traité visuellement (pente + LRM en transparence).

Au-delà de ces infrastructures, une part de l'empreinte morphologique relève des sites d'extraction mobilisés pour la construction, dont l'impact reste difficile à quantifier et à

caractériser précisément. Plusieurs sources d'approvisionnement locales ou régionales peuvent ainsi être envisagées, dont l'activité extractive est attestée ou fortement plausible.

Sur la butte de Berru, les archives mentionnent l'existence de nombreuses carrières, notamment de sablières, actives dès le début des années 1870 (tab. 5.27 ; Aumonier et Eck, 1873). À Brimont, l'exploitation de grès quartzitiques au cours du XIXe siècle constitue également une hypothèse cohérente. Plus largement, la Montagne de Reims compte près d'une centaine de sites d'extraction répertoriés pour les périodes historiques (Berthe, 2024), témoignant d'un paysage déjà largement façonné par les activités extractives avant et pendant la phase de fortification. Enfin, l'apport en calcaires issus du Massif de Saint-Thierry est documenté par l'analyse des matériaux mis en œuvre au réduit de Chenay et au fort (fig. 5.42A-C ; tab. 6.1).

Une exception notable concerne les fosses d'extraction de meulière situées à Leuvrigny, en rive gauche de la Marne, dont l'utilisation pour la construction des ouvrages du Mont de Berru est attestée de manière explicite. Les archives judiciaires associées permettent d'en localiser précisément l'emprise, jusqu'à l'échelle infra-parcellaire (fig. 6.14A-C), offrant un rare exemple de corrélation directe entre site d'extraction identifié et ouvrage fortifié destinataire.

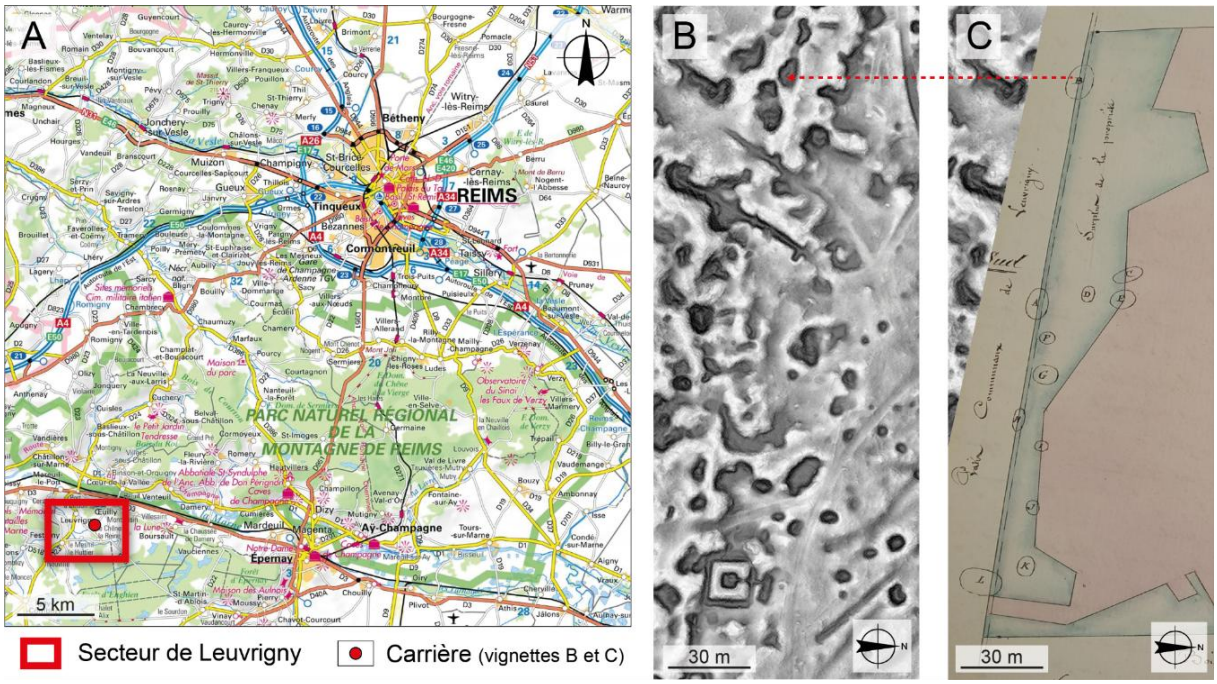


Figure 6.14 : Fosses d'extraction de meulière de Leuvrigny liées à la construction des fortifications de la butte de Berru. A : Scan Régional IGN ; B : MNT LiDAR HD (2023, IGN) traité visuellement (pente+ LRM en transparence) ; C : Plan du rapport d'expertise réalisé dans le cadre du prélèvement illégal de meulière par l'entrepreneur des forts du Mont de Berru (affaire Durantel contre Lancesseur ; AD51, 2 U 733).

Finalement, l'étude de ces formes permet de s'intéresser aux traces géomorphologiques associées à la logistique de construction (polémoformes logistiques) et donc d'envisager de manière plus complète l'impact géomorphologique de la guerre à Reims, dans le cadre de la création de la fortification permanente (Hesse, 2014). Il s'avère que la persistance morphologique est très inégale, entre certaines infrastructures temporaires qui ne sont connues que par les archives, et d'autres formes, comme le plan incliné, qui restent nettement lisibles plus de 150 ans après leur mise en place.

Conclusion de la partie 6.1.1

La genèse des reliefs fortifiés met en évidence un épisode morphogène majeur, concentré entre 1875 et 1885, dont l'ampleur dépasse largement l'emprise des ouvrages *stricto sensu*. À l'échelle de la ceinture, la construction représente environ 1 700 000 m³ de matériaux remaniés, ce qui confirme le rôle central des terrassements et du blindage en terre dans la fabrication de ces reliefs anthropiques.

L'étude des géomatériaux montre un approvisionnement multiscalaire combinant ressources locales et régionales, ainsi que des apports extrarégionaux. Les choix lithologiques apparaissent d'abord fonctionnels (ouvrabilité, durabilité, comportement hydraulique), et s'inscrivent dans des réseaux d'approvisionnement élargis par les infrastructures du XIXe siècle, notamment le chemin de fer. En parallèle, les massifs de terre ne relèvent pas d'un simple remblaiement opportuniste mais des dispositifs stratifiés, techniquement conçus pour le drainage et la protection.

Les facteurs environnementaux (géomorphologie, géologie, hydrogéologie) modulent localement la mise en forme, mais n'en constituent pas les déterminants principaux. Dans un cadre doctrinal très standardisé et face à des volumes de terrassement rapides et massifs, ils apparaissent surtout comme des contraintes et des potentialités exploitées par le Génie, dont la lecture est en outre brouillée par les remaniements initiaux eux-mêmes.

Enfin, l'impact morphologique de la fortification inclut des polémoformes indirectes liées à la logistique de construction (aménagements de chantier, voies, acheminements) et à l'extraction de géomatériaux. Leur persistance est inégale avec certaines infrastructures qui ne sont plus accessibles que par les archives, tandis que d'autres formes restent lisibles au LiDAR. Une fois ces reliefs initiaux installés, la Première Guerre mondiale constitue une deuxième rupture, en inscrivant les ouvrages dans un nouveau régime d'usages et de transformations.

6.1.2. Paysage en guerre (fonction défensive passive)

Après l'analyse des impacts morphogènes associés à la construction de la ceinture fortifiée, cette section se concentre sur la phase de guerre proprement dite, considérée comme un moment de rupture majeure dans les trajectoires du paysage géomorphologique. Cette période se caractérise par une fonction défensive indirecte des forts, déclassés et désarmés avant le conflit (*cf.* partie 3.2.3.4).

Les résultats ont montré que l'organisation spatiale des polémoformes de la Grande Guerre est fortement conditionnée par les paramètres géomorphologiques, en particulier sur les buttes-témoins et les avant-buttes, où se développent des réseaux de défense à structure cellulaire. Ils indiquent également que les forts Séré de Rivières, bien qu'intégrés à ces réseaux durant près de quatre années, n'exercent qu'une influence spatiale localisée sur leur organisation, sans remettre en cause les logiques topographiques d'ensemble.

Cette sous-partie se propose d'approfondir cette relation entre les formes créées pendant la guerre et les reliefs fortifiés, en interrogeant plus spécifiquement les implications géomorphologiques de l'intégration des forts dans les dispositifs défensifs de la Grande Guerre. Il s'agit à la fois d'évaluer dans quelle mesure la présence des forts conditionne la distribution et l'organisation des polémoformes, d'apprécier l'intensité relative des bouleversements topographiques qu'ils ont subis par rapport aux espaces environnants, et de comprendre comment l'imbrication progressive des formes de la Grande Guerre a modifié, partiellement ou durablement, la morphologie originelle des forts Séré de Rivières.

6.1.2.1. Utilisation des forts pendant le conflit

Les plans directeurs des GCTA montrent, à l'échelle des sites fortifiés, l'organisation des réseaux de défense autour des forts (fig. 6.15A-L). Dans la plupart des cas, la présence des forts génère une augmentation de la densité d'aménagements militaires, notamment de linéaires défensifs (tranchées, boyaux, réseaux de barbelés) et logistiques (câbles téléphoniques et télégraphiques), au point de constituer, à l'instar de beaucoup d'obstacles sur le champ de bataille, des centres de résistance.

Cette augmentation localisée se combine avec le gradient polémologique observé entre les ouvrages de première position, directement exposés au front (fort de la Pompelle, batterie de Loivre ; fig. 6.15C, K), les ouvrages de seconde position participant au verrouillage de secteurs clés (batterie du Cran de Brimont ; fig. 6.15E), et les ouvrages de seconde ou troisième positions occupés respectivement par les armées allemande et française (forts de Witry-lès-Reims, Nogent-l'Abbesse, Brimont, Montbré et Saint-Thierry ; fig. 6.15B, D, G, J, L). À l'inverse, certains ouvrages, tels que le fort de Fresne, la vigie et la batterie de Berru

ou le réduit de Chenay, s'insèrent plus marginalement dans ces logiques, en raison de leur position en arrière des principales lignes de défense (fig. 6.15A, F, H-I).

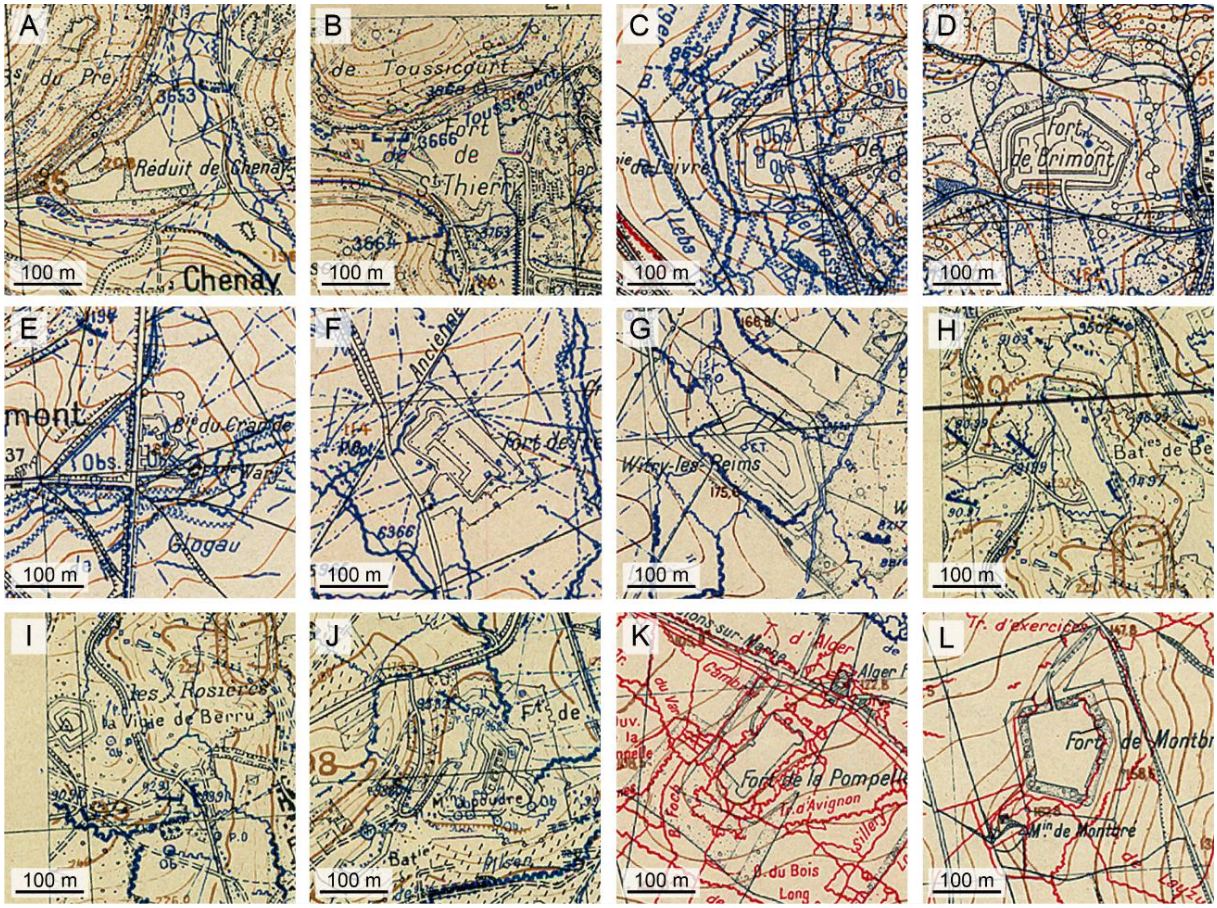


Figure 6.15 : Extraits de plans directeurs des GCTA au 1/20 000 le plus récent au droit de chaque fort de Reims. Les vignettes A et B correspondent au plan directeur de Jonchery-sur-Vesle du 23 septembre 1918 sur laquelle la majorité des aménagements militaires, bien qu'ayant été effectuée par les Français, sont représentés en bleu car occupés par les Allemands à la suite de l'offensive du printemps 1918.

Les figurés ponctuels portés sur les plans témoignent d'une réaffectation fonctionnelle marquée des ouvrages fortifiés. Ceux-ci sont utilisés comme points d'observation, nœuds de communication ou supports topographiques permettant de masquer et de protéger des positions d'artillerie en arrière immédiat. L'analyse d'une *Stellungskarte* allemande détaillée d'octobre 1917 illustre clairement cette évolution dans le cas de la butte de Brimont, où le dispositif défensif repose sur une organisation cellulaire articulant communication, défense, logistique et commandement, indépendamment de la géométrie originelle du fort (fig. 6.16), corroborant ainsi l'étude de Devos et al. (2019b) menée sur le même secteur.



Figure 6.16 : *Stellungskarte* représentant le système spatial militaire allemand en 1917 (source : Bundesarchiv).

Cette organisation induit un grand remuement des terres s'accentuant au fil du conflit. Par exemple, le linéaire cumulé de tranchées et de boyaux situé au sein du Massif de Brimont passe de 5 km à 83 km de 1914 à 1918 qui se traduit par une augmentation significative de la densité de fossés (de 1 à 20 km/km de front) et du volume de terres remuées (de 11 700 à 175 200 m^3 ; annexe 54).

Si la présence des forts n'induit pas une structuration globale des réseaux de tranchées, largement contrôlés par le relief, la végétation et les conditions de tir, elle exerce, en revanche, une influence spatiale localisée, conditionnant les modalités concrètes de leur intégration fonctionnelle. Cette réaffectation des ouvrages explique l'apparition d'aménagements spécifiques dont l'empreinte morphologique est aujourd'hui lisible dans le relief, et qui constituent autant d'indicateurs de la manière dont les forts ont été incorporés aux dispositifs défensifs de la Grande Guerre, comme cela est analysé dans la sous-partie suivante.

6.1.2.2. Expression morphologique actuelle

L'intégration des forts Séré de Rivières aux réseaux de défense de la Grande Guerre s'est accompagnée de travaux dont l'empreinte morphologique demeure aujourd'hui lisible dans les données LiDAR. Ces héritages se déclinent en plusieurs types de formes, résultant de relations spatiales différenciées entre les ouvrages fortifiés et les polémoformes associées, en lien avec des fonctions distinctes (fig. 6.17A-F) identifiées par le croisement des observations de terrain, des plans directeurs et des photographies aériennes (fig. 6.18A-C).

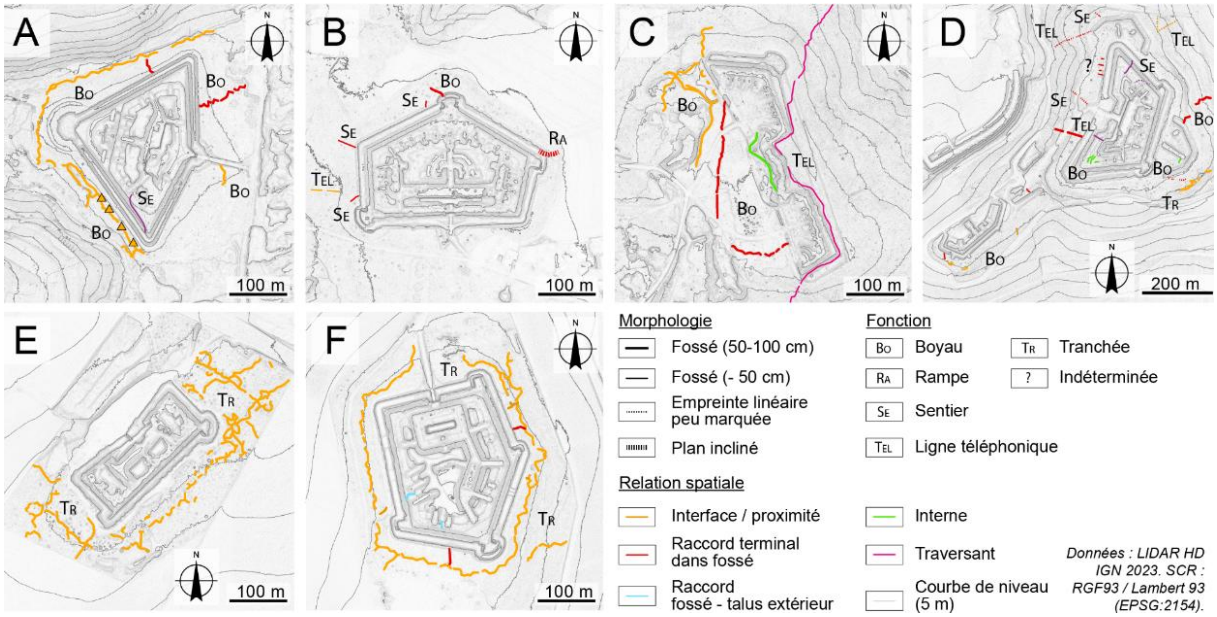


Figure 6.17 : Typologie morphologique, spatiale et fonctionnelle des fossés militaires situés dans l'environnement des forts Séré de Rivières. A : Fort de Saint-Thierry ; B : Fort de Brimont ; C : Batterie de Berru ; D : Fort de Nogent-l'Abbesse ; E : Fort de la Pompelle ; F : Fort de Montbré.

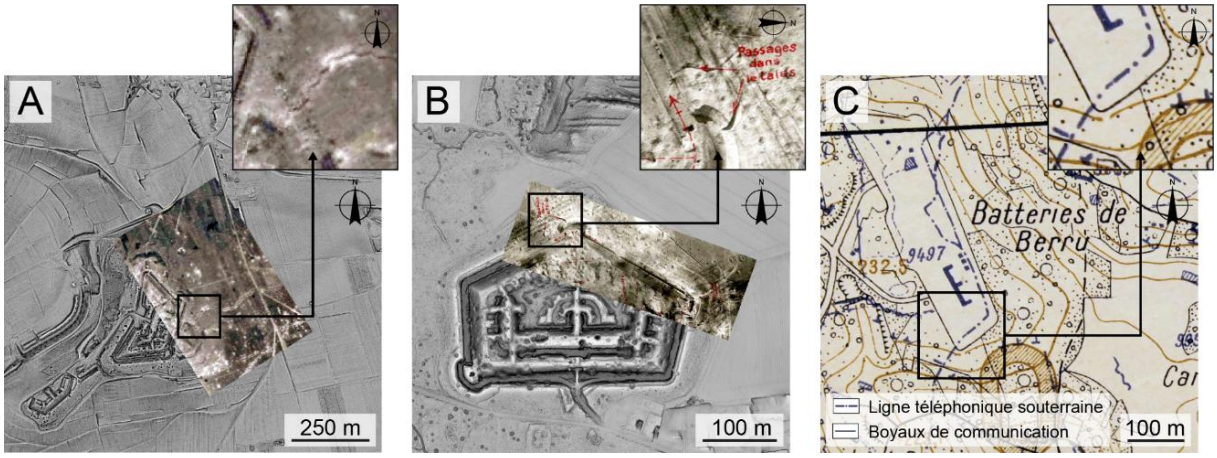


Figure 6.18 : Exemples d'indices photographiques et cartographiques d'intégration des forts aux réseaux de défense de la Grande Guerre. A : Fort de Nogent-l'Abbesse (source photo : AD51) ; B : Fort de Brimont (source photo : Musée Saint-Rémi de Reims) ; C : Batterie de Berru (plan directeur de Beine NO au 1/10 000 du 16 septembre 1918 ; SHD, GR 6M LVIB1B 41 - 3).

Tout d'abord, sur les glacis, les réseaux de tranchées et de boyaux à la périphérie immédiate des forts, constituant des centres de résistance, persistent sous la forme de fossés relativement profonds, fréquemment supérieurs à 50 cm et parallèles au fossé de l'ouvrage. Cette configuration est nettement observable aux forts de Saint-Thierry et de Montbré, tous deux en troisième position, ainsi qu'au fort de la Pompelle, en première position du côté français (fig. 6.17A, E-F). Elle apparaît en revanche plus discrète, voire absente, autour des ouvrages occupés par les Allemands (fig. 6.17B-D). En effet, d'après les plans directeurs, seul le fort de Witry-lès-Reims est entouré par un linéaire de tranchée continu ceinturant l'ouvrage (fig. 6.15G).

L'intégration effective entre le fort et les réseaux de défense s'opère par la mise en place de dispositifs de connexion, qui s'observent notamment aux forts de Saint-Thierry et de Montbré (fig. 6.17A, F-G), et surtout aux forts de Brimont (fig. 6.17B, 6.19) et Nogent-l'Abbesse (fig. 6.17D, 6.20).

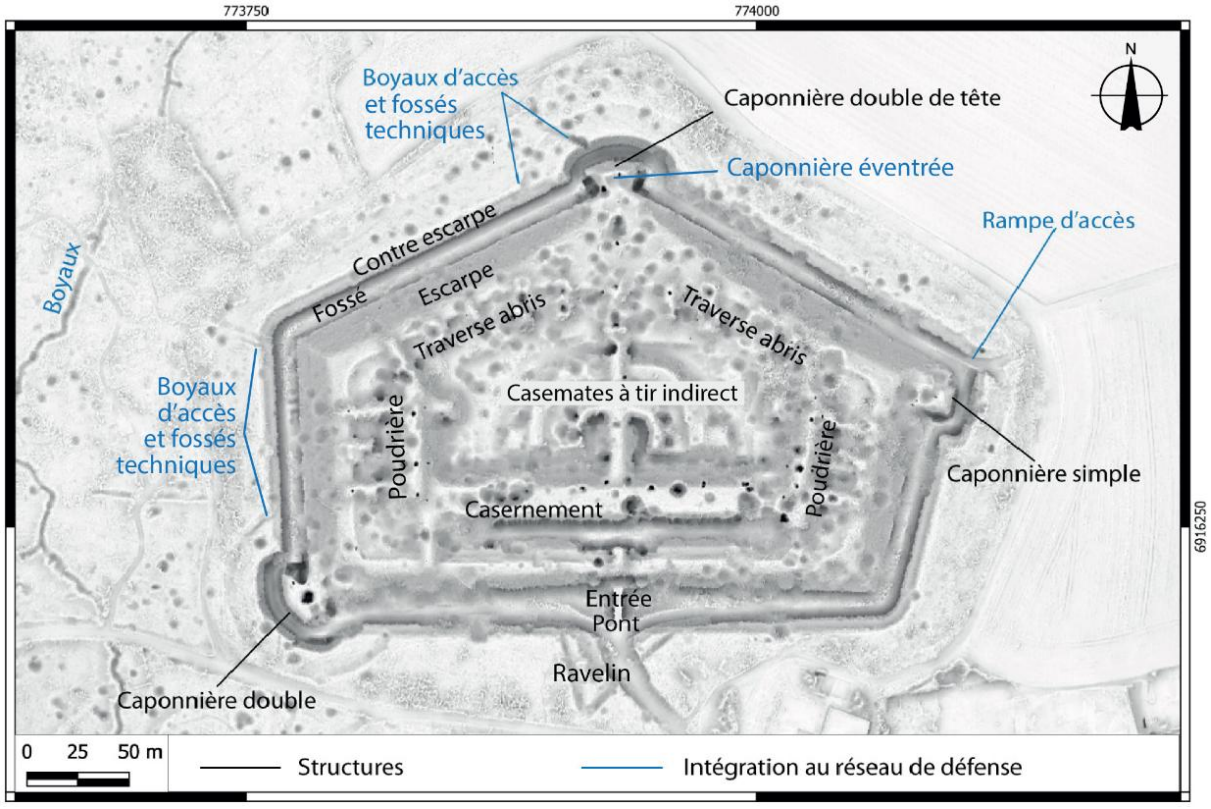


Figure 6.19 : Travaux d'intégration aux réseaux de défense allemands réalisés au fort de Brimont.

L'accès aux ouvrages s'effectue par le percement de la contrescarpe par des boyaux de communication perpendiculaires, parfois complétés par des rampes débouchant dans le fossé, transformant ce dernier en interface de circulation. L'ouverture de façades de caponnières (fig. 6.2) et la création de sentiers à travers la partie externe du rempart (plongée, talus extérieur) permettent ensuite d'accéder aux terre-pleins et à l'intérieur du fort. Le franchissement du fossé est parfois assuré par des passerelles en bois aujourd'hui

disparues, attestées par les photographies anciennes, notamment au fort de Nogent-l'Abbesse (annexe 55).

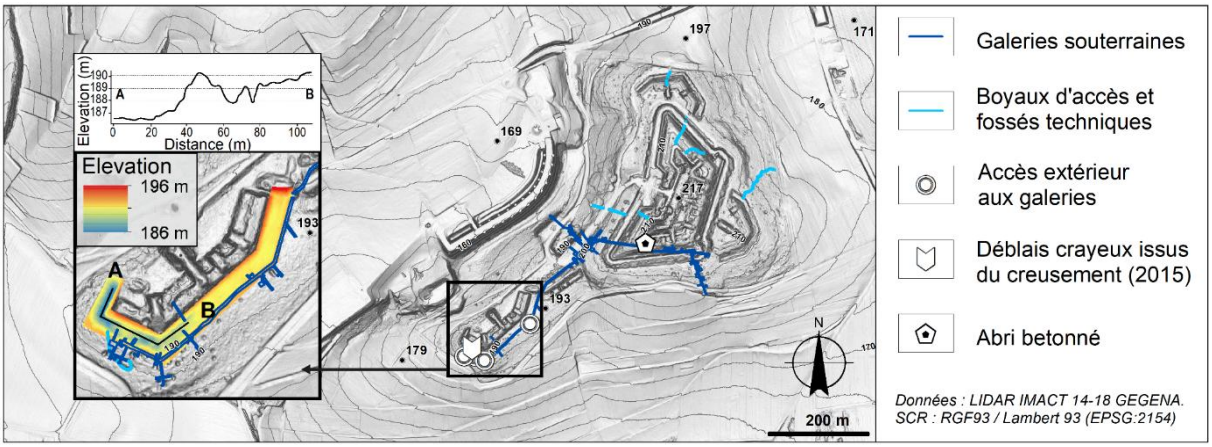


Figure 6.20 : Travaux d'intégration aux réseaux de défense allemands réalisés au fort de Nogent-l'Abbesse.

Certaines tranchées aboutissant dans le fossé sont également aménagées afin de sécuriser le passage de lignes téléphoniques et télégraphiques, soit pour desservir des structures militaires actives à l'intérieur des forts, soit pour utiliser le défilement offert par le fossé lors de traversées du secteur, comme cela s'observe à la batterie de Berru (fig. 6.17C, 6.18C). Les documents d'archives attestent également de l'emploi de voies ferrées étroites qui ne semblent toutefois pas aussi morphogènes dans les forts, où le sol est souvent propice à l'installation des superstructures ferroviaires (annexe 56A-C), qu'au sein des reliefs environnants pouvant nécessiter des terrassement relativement imposants (*cf.* partie 5.3.1.2). Ces connexions traduisent une adaptation des ouvrages à la réalité du champ de bataille, dont le front de gorge, initialement le moins fortifié selon le principe d'irréversibilité, se retrouve exposé aux lignes ennemies à la suite de l'inversion de l'orientation des structures par rapport aux directions dangereuses, consécutive à l'établissement de la ligne de front à l'intérieur de la ceinture fortifiée (fig. 3.50).

Les structures militaires ponctuelles associées à cette intégration présentent une signature morphologique plus ambiguë. Elles correspondent principalement à des observatoires bétonnés implantés au sommet des remparts des forts de Montbré (fig. 6.21A-D), de Nogent-l'Abbesse (annexe 57 ; Coutant et al., 2017), et de la batterie de Berru (fig. 6.22A-F). Le fort de Saint-Thierry illustre par ailleurs l'usage du masque topographique fourni par l'ouvrage à des fins d'artillerie, avec l'implantation d'emplacements de tir en contrepente du glacis sud-ouest, bénéficiant directement de la protection du massif central (fig. 6.23).

Le fort de Nogent-l'Abbesse constitue un cas particulier par l'ampleur des travaux souterrains par ailleurs réalisés. Afin d'éviter le découvert, des galeries à l'épreuve sont creusées dans la craie à partir de la caponnière double pour rejoindre l'extérieur du fort

(fig. 6.20, annexe 57A-B). L'une de ces galeries dessert le magasin à poudre de 1892 (annexe 58), transformé en poste de commandement et en centrale électrique (Coutant et al., 2017), avant de se prolonger vers la batterie sud-ouest, dont le flanc est percé d'observatoires bétonnés. Le creusement de ces tunnels pendant le conflit génère des déblais morphogènes, en partie évacués par une voie ferrée étroite et déposés en divers points du fort afin de dissimuler les travaux (annexe 56B). Le LiDAR révèle précisément une surélévation topographique d'environ 3 m dans le fossé de la batterie annexe correspondant à une relique de ces remblais, dont l'enlèvement était encore en cours en 2015 (fig. 6.20).

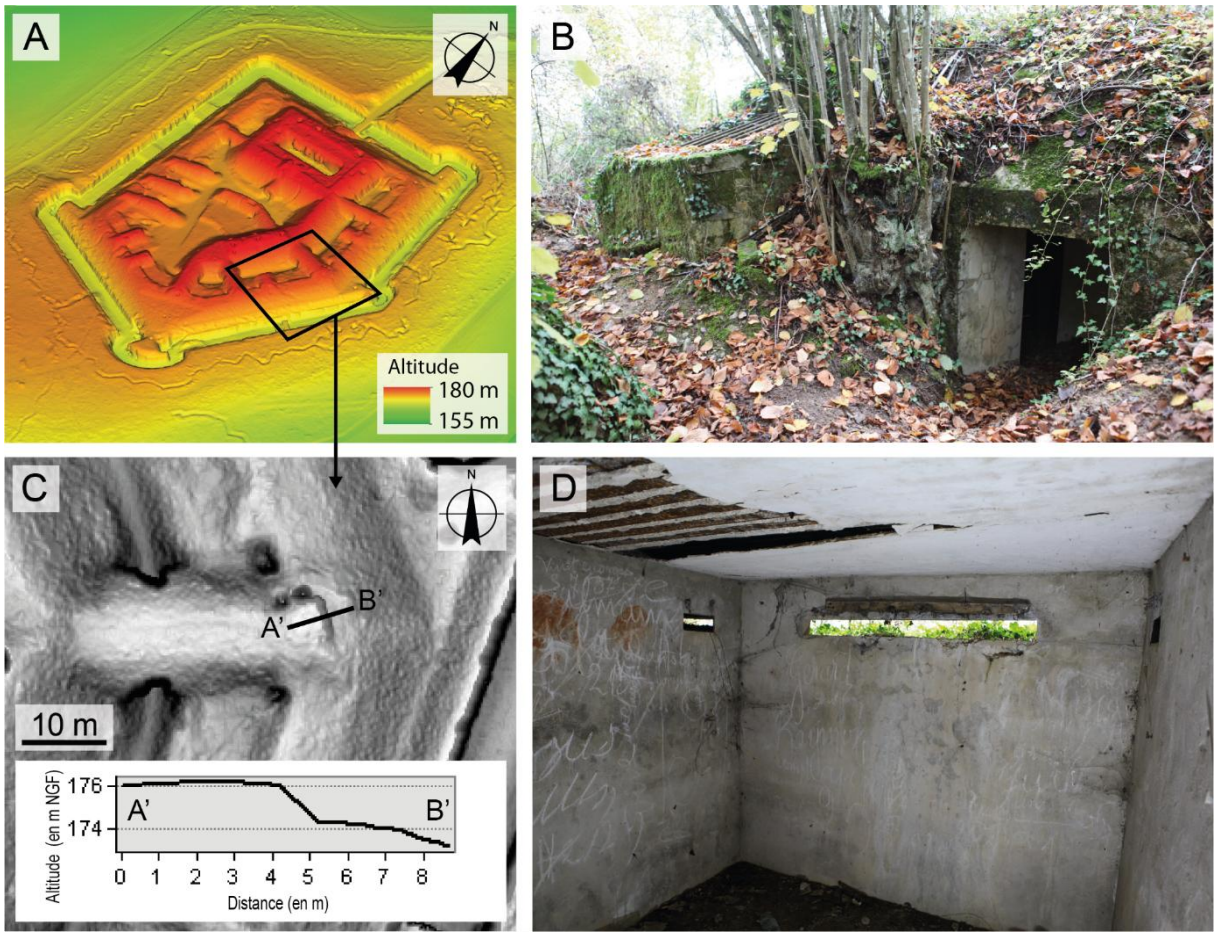


Figure 6.21 : Casemate bétonnée française située au sommet du rempart du fort de Montbré. A : Vue topographique en perspective (données LIDAR HD IGN 2023) ; B : Entrée de l'abri (cl : Alain Devos) ; C : MNT LiDAR HD (2023, IGN) traité visuellement (pente + LRM en transparence) ; D : Intérieur de l'abri (cl : Alain Devos).

À l'échelle du fort, le développement d'environ 1 km de galeries connues et cartographiées s'accompagne de travaux d'aération, de ventilation et de sorties de secours, également morphogènes, représentant un volume excavé total de l'ordre de 5 000 m³. À l'inverse, le tunnel d'accès dit « métro » du fort de la Pompelle, démarrant près du canal de l'Aisne à la Marne, n'implique, en revanche, aucune perturbation de surface repérée au LiDAR, bien que révélant une réorganisation interne poussée de l'ouvrage (annexe 60).

Enfin, au-delà des impacts morphogènes directement observables sur les sites fortifiés, la position stratégique des forts sur les principaux reliefs structurant la percée cataclinale de la Vesle conditionne indirectement l'implantation d'artillerie lourde sur voie ferrée (ALVF) par l'armée française. Cette influence se matérialise par la création d'épis de tir, principalement localisés sur le plateau de la Montagne de Reims et en arrière du Massif de Saint-Thierry (annexe 61). Morphologiquement, ces aménagements subsistent aujourd'hui sous la forme de plateformes terrassées, rectilignes ou légèrement courbes, portées par des remblais ou inscrites en déblai selon la configuration du relief (fig. 6.24 ; Perarnau et al., 2022). Ils témoignent d'une influence élargie des forts, qui sont la cible de cette ALVF (*cf.* partie 6.1.2.3) sur les systèmes spatiaux militaires de la Grande Guerre, dépassant largement l'échelle de leur site de construction.

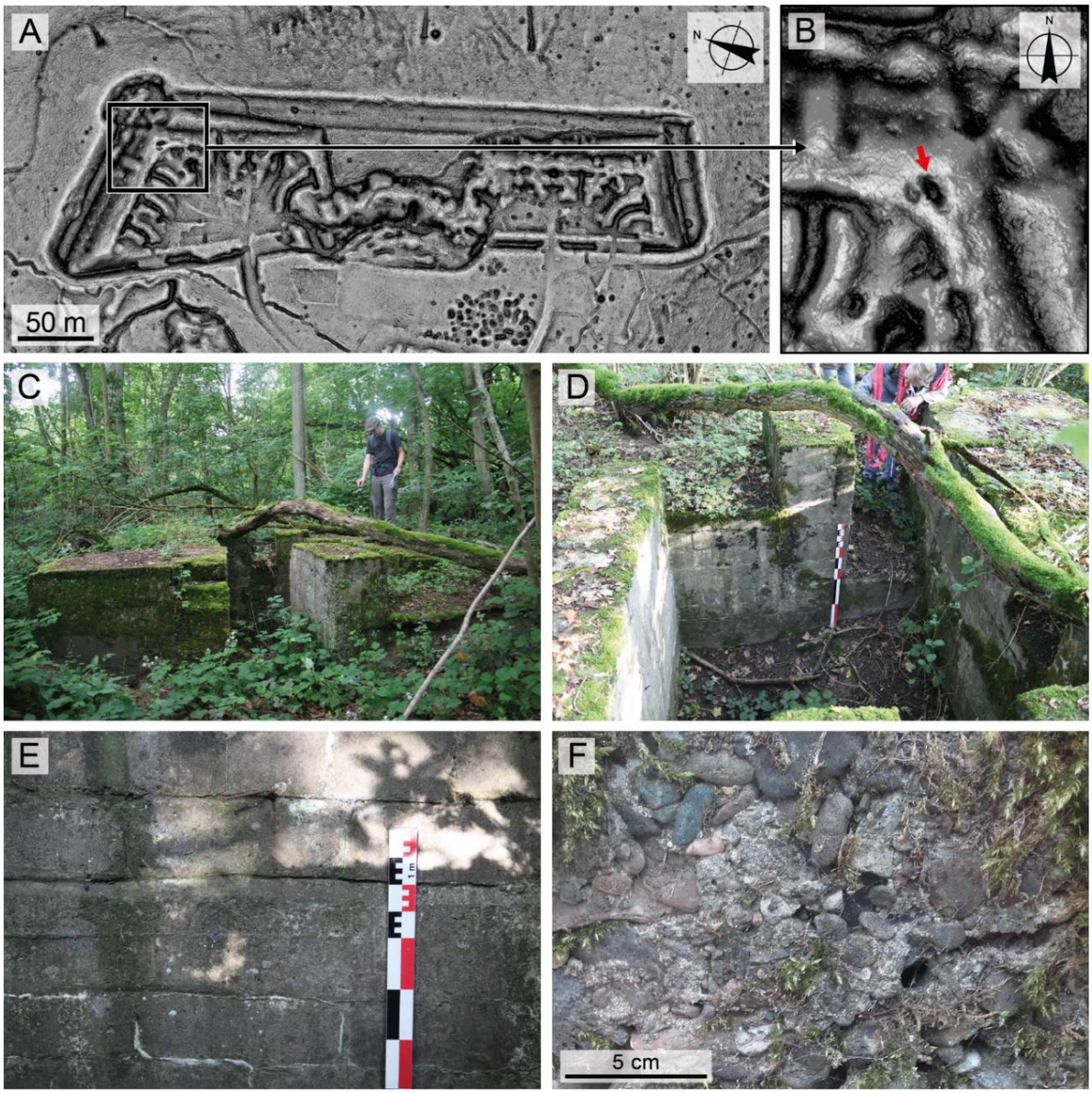


Figure 6.22 : Casemate bétonnée allemande située au sommet du rempart de la batterie de Berru. A : MNT LiDAR (2023, IGN) traité visuellement (pente + LRM en transparence) ; B : Agrandissement de la vignette

A au droit de la structure ; C : Entrée de la structure (cl : Jean-Michel Durlet) ; D : Structure vue du dessus ; E : Paroi intérieure du blockhaus en blocs de béton préfabriqués ; F : Galet de quartz et autre alluvions siliceuses dans le béton banché.

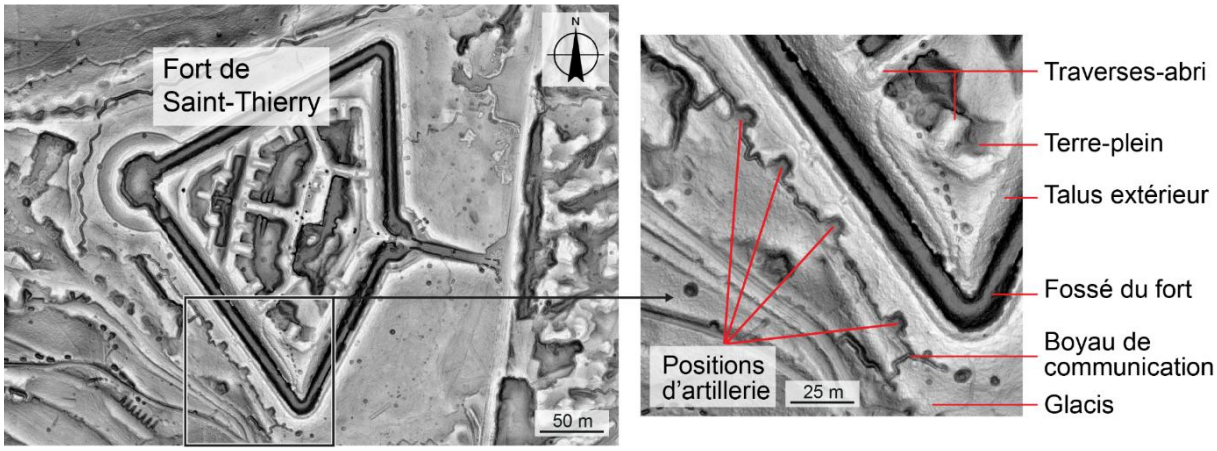


Figure 6.23 : Emplacements d'artillerie placés en contrepente du glacis du fort de Saint-Thierry (MNT LIDAR HD IGN 2023 traité visuellement via un indice de pente combiné à un LRM en transparence).

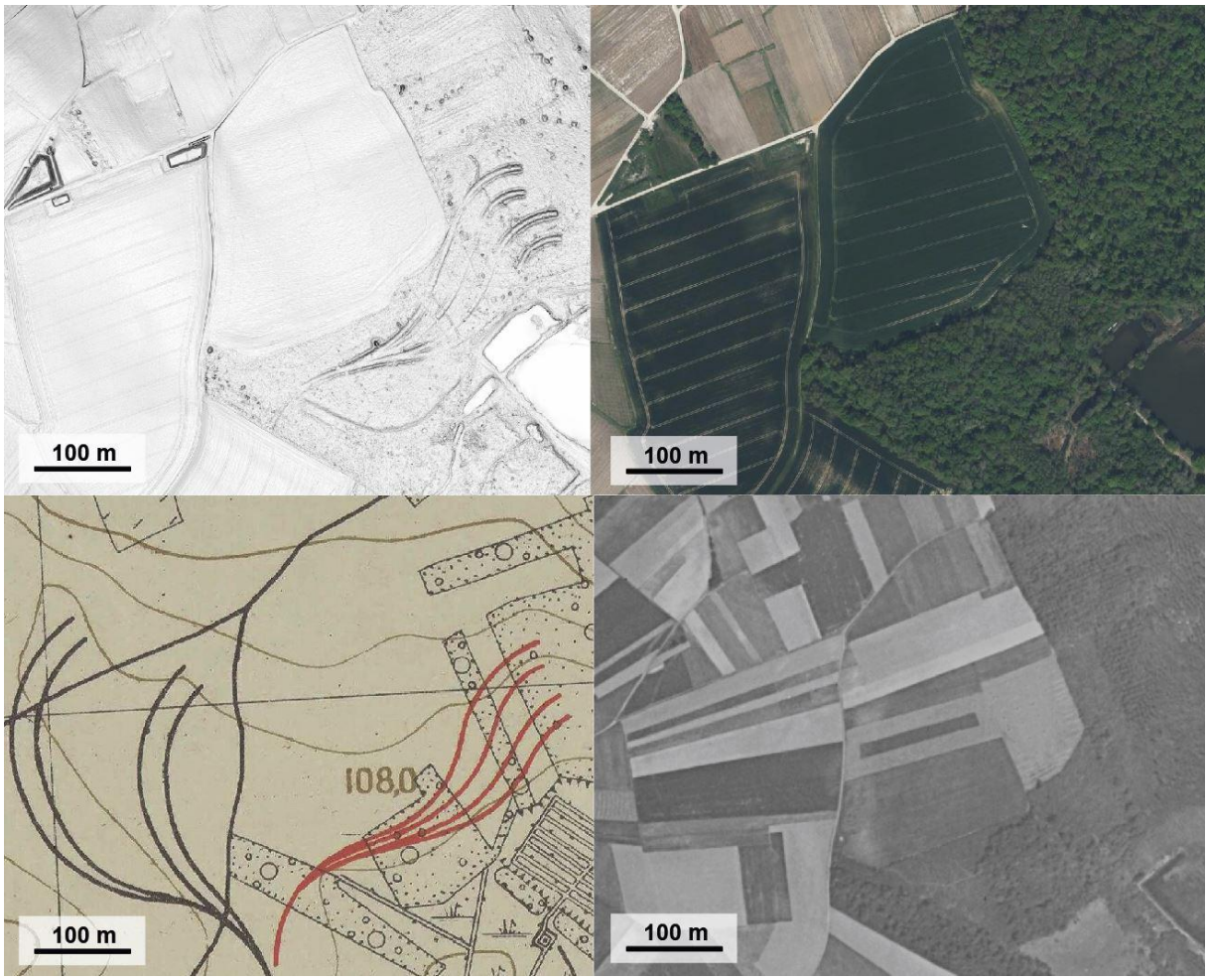


Figure 6.24 : Épis de tir terminaux du vallon de Trigny (annexe 61). En haut à gauche : MNT LiDAR HD (2023, IGN) traité visuellement (indice de pente) ; En bas à gauche : Plan directeur de tir de Jonchery NE du 28 janvier 1918 ; En haut à droite : Orthophotographie IGN (BD ORTHO®, 2019) ; En bas à droite : Photographie aérienne de 1949 de l'IGN (BD ORTHO® Historique, 2016).

L'intégration des forts aux réseaux de défense de la Grande Guerre a généré un ensemble d'aménagements militaires dont l'empreinte morphologique aujourd'hui perceptible ne rend compte que d'une partie des transformations générées par le conflit. En parallèle de ces adaptations spatiales, les ouvrages fortifiés ont également été soumis à des processus de destruction directe liés aux tirs d'artillerie, dont les effets morphogènes, souvent plus brutaux, ont contribué à reconfigurer localement et durablement les reliefs hérités. C'est à l'analyse de cette bombturbation, en tant que processus géomorphologique spécifique de la guerre industrielle (Hupy et Schaetzl, 2006), que se consacre la sous-partie suivante.

6.1.2.3. Bombturbation

La densité élevée de cratères d'obus sur certains ouvrages, décrite en résultats, invite à interroger la nature, la distribution et les conséquences morphologiques de ces impacts. En l'occurrence, l'inventaire LiDAR des cratères d'obus indique des surfaces cratérisées aujourd'hui inférieures à 2 % dans la plupart des ouvrages, à l'exception des forts de Nogent-l'Abbesse (4 %), Brimont (4,9 %) et la Pompelle (5,9 % ; fig. 6.25A-C).

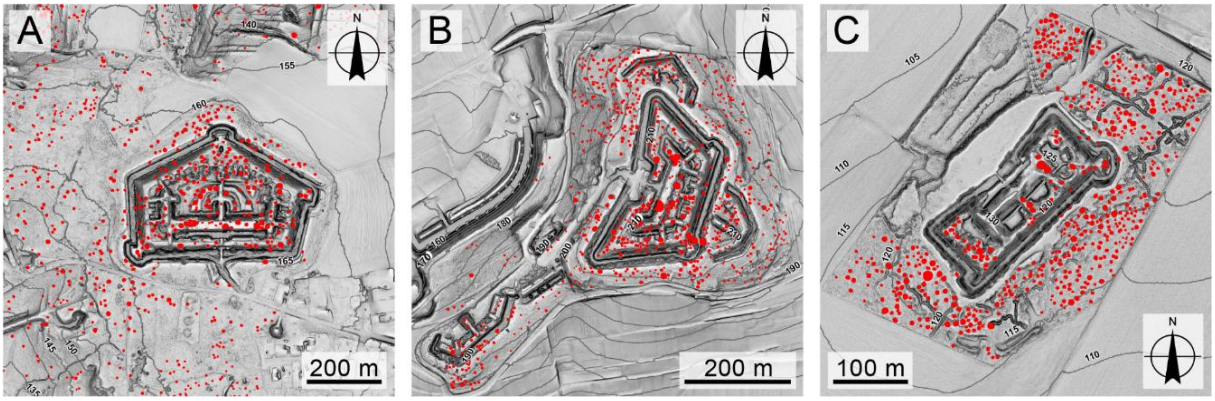


Figure 6.25 : Inventaire des cratères d'obus sur les principaux forts pilonnés pendant la Première Guerre mondiale (MNT LIDAR traité visuellement via l'indice de pente). A : Fort de Brimont (LIDAR IMPACT 14-18, 2015) ; B : Fort de Nogent-l'Abbesse (LIDAR IMPACT 14-18, 2015) ; C : Fort de la Pompelle (LIDAR HD 2023 IGN).

Ces valeurs apparaissent relativement modérées par rapport à d'autres forts en France, tels que celui de la Malmaison (place de Laon), où au moins un cinquième de la surface est cratérisée, ou le fort de Douaumont (place de Verdun), situé dans un secteur du front bien plus exposé, où le nombre d'impacts est quatre fois supérieur (De Matos-Machado, 2018 ; *cf.* partie 6.2.3.2.2). À Reims, cette variabilité s'explique en première approche par le positionnement différencié des ouvrages au sein des réseaux défensifs, les forts français situés en troisième position (Montbré, Chenay, Saint-Thierry) ne présentant que 0,5 à 1,5 % de surface cratérisée. Cette lecture doit toutefois être nuancée par l'importance des aménagements postérieurs au conflit, susceptibles d'avoir masqué ou effacé une partie des signatures initiales (*cf.* partie 6.1.3). À titre d'exemple, les faibles surfaces cratérisées actuelles du fort de la Pompelle et de la batterie de Loivre (1,2 %) contrastent nettement avec

l'ampleur des bouleversements topographiques visibles sur les photographies aériennes militaires contemporaines du conflit (fig. 6.26, 6.27).



Figure 6.26 : Photographie aérienne oblique du fort de la Pompelle de mai 1917. La couleur blanche du fort, associée au matériau crayeux qui constitue l'avant-butte et une partie des remblais du fort, situé en bas à gauche de l'image, suggère une bombturbation exacerbée sur le fort induit par les tirs d'obus (fonds Fouqueray).

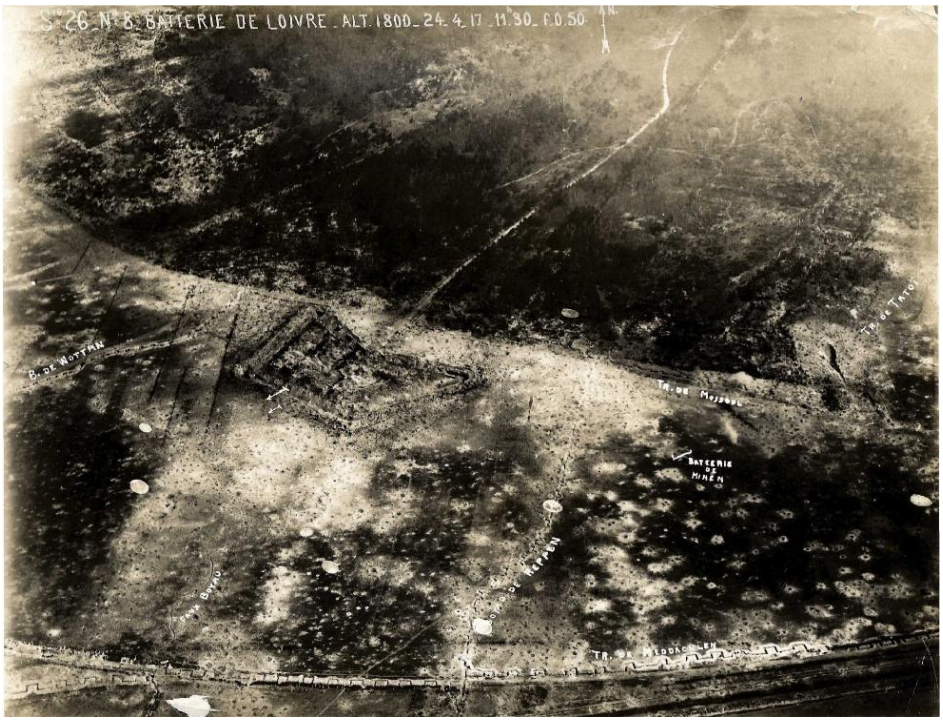


Figure 6.27 : Photographie aérienne oblique de la batterie de Loivre d'avril 1917 (Fonds Fouqueray).

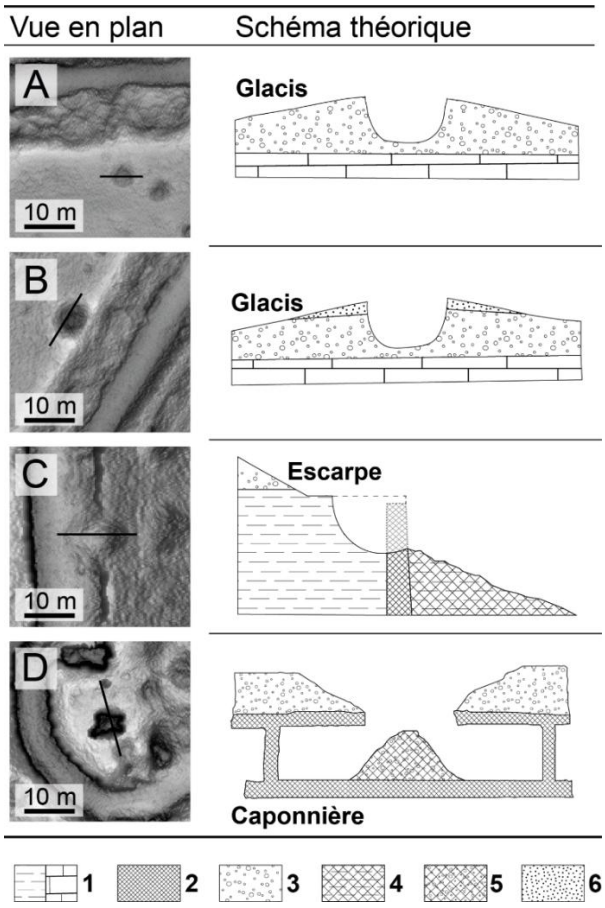


Figure 6.28 : Typologie des cratères d'obus affectant les polémoformes Séré de Rivières. A : entonnoir d'obus sans bourrelet périphérique ; B : entonnoir d'obus avec bourrelet d'éjecta ; C : régularisation de l'escarpe par effondrement du mur et colluvionnement dans le fossé ; D : entonnoir d'obus agrandi par une crevaison de fontis. 1 : Substrat géologique ; 2 : Maçonneries ; 3 : Remblais constituant le massif de terre d'un fort Séré de Rivières ; 4 : Cône d'accumulation de matériaux hétérogènes (substratum, remblais, géomatériaux maçonnés) ; 5 : Cône de soutirage de matériaux hétérogènes (remblais, géomatériaux maçonnés) ; 6 : Bourrelet d'éjecta.

Les tirs d'artillerie produisent sur les forts de Reims une gamme de formes distinctes regroupées en quatre types morphologiques (fig. 6.28A-D). Les cratères simples, avec ou sans bourrelet d'éjecta périphérique, que l'on retrouve typiquement sur les champs de bataille de la Grande Guerre (fig. 5.86A-B), affectent principalement les terre-pleins, les massifs de terre, et les glacis (fig. 6.28A-B). D'autres impacts correspondent aux cratères associés à l'effondrement des maçonneries en surface, en particulier au droit des escarpes et contrescarpes (fig. 6.28C, 6.29A). Ces effondrements contribuent à la régularisation des pentes par colluvionnement dans le fossé, modifiant donc directement la distribution des valeurs de pente relevées au LiDAR (fig. 5.17A-B). Enfin, certains cratères résultent de l'effondrement des voûtes des casemates en subsurface, tel que la caponnière ou le casernement (fig. 6.28D, 6.29B-D), déclenché directement à l'impact ou relatif à une crevaison de fontis postérieure produisant des désordres géotechniques plus complexes. Globalement, tous ces impacts réduisent l'indice de rugosité à l'échelle du fort (RgI), par l'ablation des microreliefs convexes et le comblement des formes concaves (tab. 5.5).

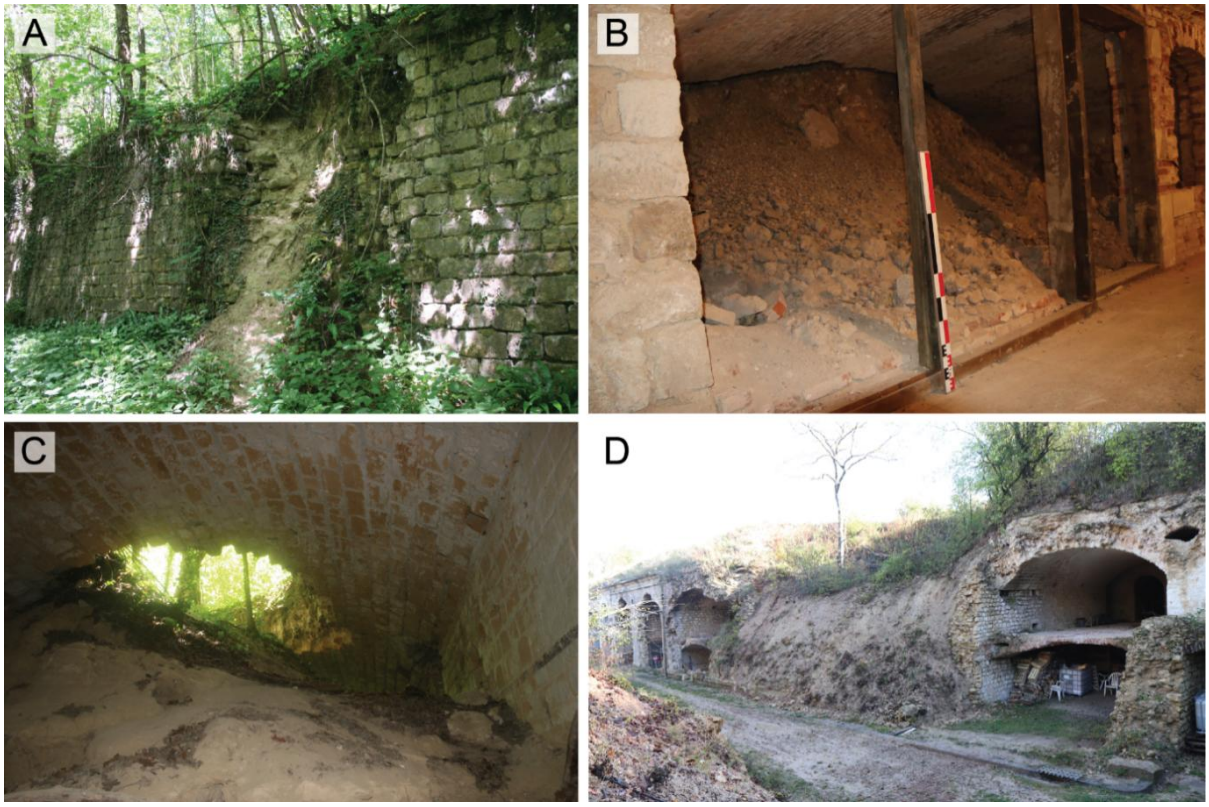


Figure 6.29 : Désordres géotechniques aux forts de Brimont (A,C) et Nogent-l'Abbesse (B, D) causé par des tirs d'artillerie (cl : Alain Devos). A : Impact d'obus sur le mur de contrescarpe ; B : Cône de fontis au droit d'un impact d'obus ; C : Toit du casernement éventré ; D : Casernement éventré par le tir français d'un obus de 400 mm.

Sur les forts de Brimont et Nogent-l'Abbesse, la distribution spatiale des impacts n'est pas aléatoire, avec une concentration préférentielle au droit des composantes fonctionnellement sensibles des forts, notamment les casernements et les caponnières doubles (fig. 6.25A-B).

Les diagrammes de distribution des diamètres des cratères montrent une spécificité. Les impacts affectant les emprises fortifiées présentent des classes modales plus élevées que celles des secteurs environnants, avec une surreprésentation de cratères de grand diamètre et environ 10 % d'impacts dépassant 8 m (fig. 6.30A-D). Cette signature est compatible avec des tirs d'artillerie lourde ciblés, notamment l'emploi de projectiles brisants de gros calibre (fig. 5.83B).

Certains des impacts les plus emblématiques sont attribuables à des tirs d'ALVF comportant des obusiers de 400 mm. Au fort de Nogent-l'Abbesse, 38 coups sont tirés par la 77e batterie du 3e RAP les 9 et 10 avril depuis l'arrière d'une croupe située au sud-ouest de Montbré, provoquant notamment un cratère de près de 20 m de diamètre ayant éventré le casernement (fig. 6.29D). Des tirs similaires sont documentés au fort de Brimont,

bombardé depuis le secteur du vallon de Trigny (annexe 61), où un obus aurait « *atteint une casemate après avoir traversé plus de sept mètres de terre avant de percer la maçonnerie [...], causant la mort de 6 soldats et en blessant 15 autres* » (Legay, 2018). Ces exemples illustrent une nouvelle fois le passage d'une logique de fortification conçue pour résister à l'artillerie du XIXe siècle à une vulnérabilité structurelle des forts de type 1874 face à la guerre industrielle du XXe siècle.

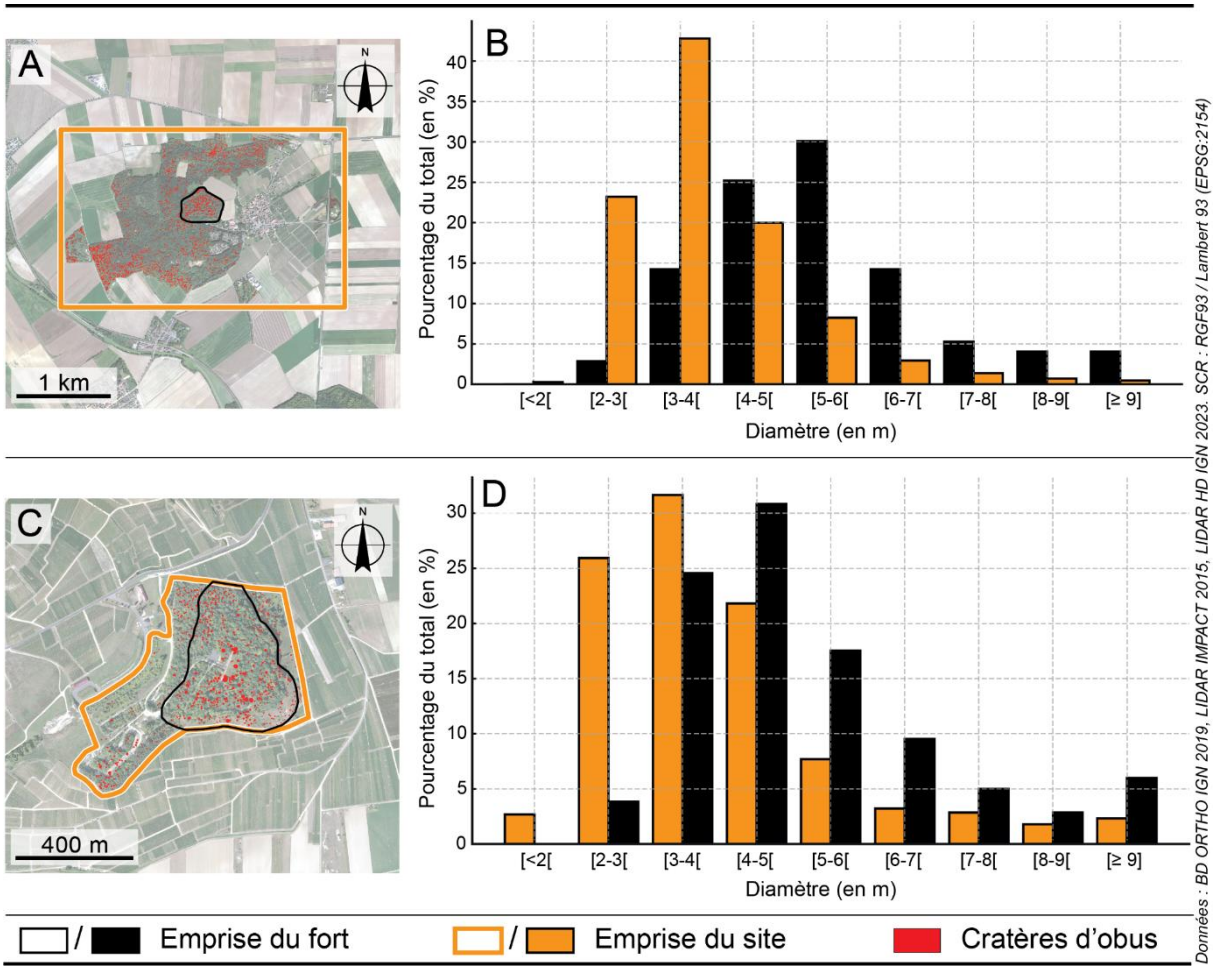


Figure 6.30 : Diagrammes de distribution des diamètres des cratères d'obus des forts les plus pilonnés pendant la Première Guerre mondiale : Brimont (A-B) et Nogent-l'Abbesse (C-D). A, C : Emprises spatiales concernées par les diagrammes ; B, D : Diagrammes.

Conclusion de la partie 6.1.2

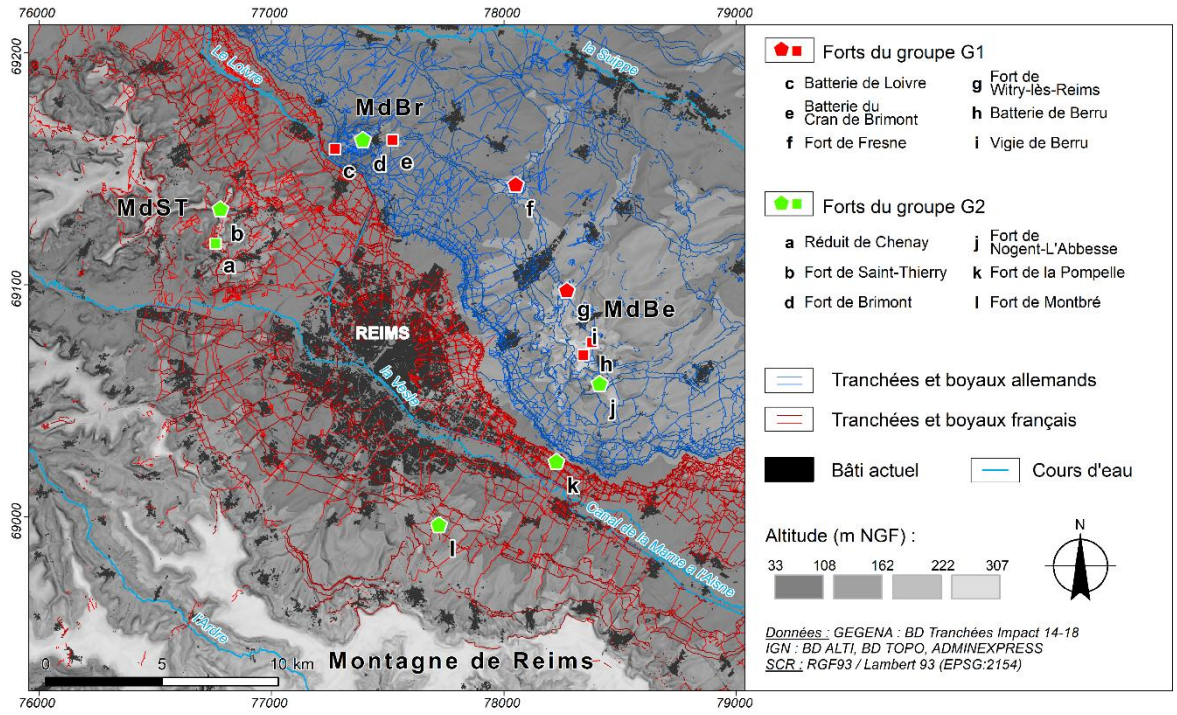
L'analyse du paysage en guerre permet d'apporter des éléments de réponse clairs aux problématiques posées en ouverture de cette section. Elle montre que les forts Séré de Rivières conditionnent effectivement, mais de manière inégale, la distribution des polémoformes de la Première Guerre mondiale. Dans la majorité des cas, leur présence s'accompagne d'une augmentation locale de la densité des aménagements militaires, traduisant, à la fois, la mauvaise orientation initiale des ouvrages face à la ligne de front et leur réaffectation fonctionnelle (infrastructures logistiques, de communication et d'observation).

L'intégration progressive des forts aux réseaux de défense se traduit par des modifications morphologiques ciblées, affectant principalement le glacis (augmentation de l'obstacle, notamment effectif sur les ouvrages français), ainsi que le fossé (interface de circulation), accompagnée de l'apparition de structures militaires ponctuelles témoignant d'une adaptation pragmatique des forts aux contraintes de la guerre industrielle. Elle prend également une forme souterraine largement sous-représentée dans les signatures morphologiques de surface (déblais, entrées), que le LiDAR aéroporté seul permet difficilement de documenter. Il est, à ce titre, plausible que d'autres souterrains non découverts existent.

L'intensité des bouleversements morphologiques liés aux combats ne se traduit pas de manière univoque par une surdensité d'impacts d'artillerie sur l'emprise des forts. En revanche, l'analyse morphométrique révèle une spécificité nette des forts en termes de calibres employés, matérialisée par des diamètres de cratères plus importants soulignant le lien entre la bombturbation, l'intégration fonctionnelle des ouvrages aux réseaux de défense et la vulnérabilité notable de ces structures non modernisées face à l'artillerie lourde (*cf.* partie 2.5.2).

6.1.3. Paysage d'après-guerre, trajectoires post-conflictuelles (fonction défensive désactivée)

À l'issue de la Première Guerre mondiale, les processus de transformation des morphologies Séré de Rivières se poursuivent. La fonction défensive des fortifications, à certaines exceptions près, est définitivement désactivée, du fait des évolutions doctrinales de la fortification poussant à s'enterrer, ouvrant une nouvelle phase de leur morphogenèse. Les ouvrages entrent, alors, dans des trajectoires d'évolution différenciées (fig. 6.31), étroitement conditionnées par les modalités de réaffectation des sites, parfois les usages qui leur sont assignés, et les propriétés géomorphologiques et géologiques de ces reliefs anthropiques. Cela est notamment rendu possible par la loi du 16 février 1932, qui radie l'ensemble des ouvrages de la place de Reims du classement des places de guerre et autorise, lorsqu'ils ne sont pas réemployés à des fins militaires, leur cession à des acteurs civils par l'administration des domaines.



Fort	Propriétaire	Usage récent et actuel
a	Privé	Centre équestre Villégiature
b	Commune	Association mémorielle
c	Privé	Circuit, stand de tir
d	Commune	Association mémorielle
e	Privé	Indéterminé
f	Privé (?)	Terrain de motocross

Fort	Propriétaire	Usage récent et actuel
g	Privé	Stockage de déchets inertes
h	Privé (?)	Aucun
i	État	Centre de transmission militaire
j	Privé (Coopérative)	Association mémorielle Stockage de champagne
k	Commune	Muséographie
l	Commune	Activités ludiques

Figure 6.31 : Ceinture fortifiée de Reims selon le degré d'effacement entre les polémoformes les plus effacées (G1, rouge) et celles encore lisibles (G2, vert).

L'analyse de l'effacement topographique des forts a révélé des états de conservation inégaux à partir de l'étude de la rugosité (TRI, RIg) et de la distribution des valeurs de pente du couple rempart-fossé issues des données LiDAR (*cf.* partie 5.2.2.2 ; fig. 6.31). D'une part se dessinent les forts du groupe G1, où ne subsistent le plus souvent que de vagues contrastes volumétriques entre le massif central, le fossé et le glacis. Il est représenté par TRI ≤ 0,26, RgI ≤ 1,12 et une distribution bimodale des valeurs de pentes, dont la médiane (Med) et la moyenne (Moy) sont inférieures ou égales à 16,5 et 19,6, marquée par un premier pic (P1 ; 2-7°) dont la fréquence cumulée croissante (FCC) est élevée (55,9-84,4 %).

D'autre part, les forts du groupe G2 sont constitués de morphologies dont l'organisation interne est majoritairement ou complètement compréhensible. Il se dégage dans les données statistiques par TRI ≥ 0,31, RgI ≥ 1,17, et des valeurs de pente dont les valeurs centrales diffèrent avec Moy ≥ 22,7, Me ≥ 23,5 et une distribution trimodale, via l'apparition d'un troisième pic à 66-73°.

Afin de comprendre cette différence d'intégrité morphologique, cette section analyse les facteurs et les processus ayant conduit à la conservation, à la transformation, ou à l'effacement partiel, voire presque total des morphologies fortifiées. Ces mécanismes agissent soit directement sur le relief, soit sur la maçonnerie des structures bâties, avec des répercussions ultérieures sur la topographie. Cette analyse offre ainsi un cadre pour appréhender les trajectoires paysagères différenciées des forts au cours des dernières décennies.

6.1.3.1. Facteurs de conservation

L'étude des trajectoires des forts du groupe G2 indique que la réaffectation fonctionnelle de la structure fortifiée, intervenant sur une période assez longue, constitue le facteur principal favorisant la préservation de certaines polémoformes Séré de Rivières, bien que dans une certaine mesure, elle puisse être corrélative à des détériorations. Trois trajectoires-type s'affirment :

(i) La première concerne la réutilisation militaire suivie d'une réappropriation des communes ou d'acteurs associatifs ou secteur coopératif :

- Fort de Brimont : dépôt de munitions et base radar de la BA112 (base aérienne 112) puis acquisition par la commune de Brimont en 1998 et valorisation par une association patrimoniale locale (Association des forts de Saint-Thierry et Brimont ; fig. 6.32A).

- Fort de Nogent-l'Abbesse : dépôt de munitions de 1937 à 2004, puis acquisition par la commune, et enfin par la coopérative vinicole de Nogent-l'Abbesse et Cernay-lès-Reims en 2012 (fig. 6.32B), laquelle emploie notamment des cellules de stockage de munitions pour entreposer du champagne (fig. 6.32C ; *cf.* partie 6.1.3.4).

- Fort de Montbré : utilisation militaire du site jusqu'en 2013 (13e régiment du Génie d'Épernay), puis mis à disposition par la commune propriétaire (Taissy) pour des activités ludiques (*e.g.*, airsoft ; **fig. 6.32D**).



Figure 6.32 : Exemples de réaffectations fonctionnelles corrélatives à un effacement limité de la topographie d'un fort Séré de Rivières de la ceinture de Reims. A : Logo de l'Association des forts de Saint-Thierry et Brimont ; B : Logo de la Coopérative vinicole de Nogent-l'Abbesse et Cernay-lès-Reims ; C : Soute à munitions de l'entre-deux-guerres reconvertie en cave à champagne au fort de Nogent-l'Abbesse ; D : Logo de Rèmes Brigade (association de airsoft) et joueur dans le casernement du fort de Montbré (cl : Rèmes Brigades) ; E : Aile gauche du casernement du réduit de Chenay reconverti en logement (cl : Alain Devos).

(ii) La deuxième correspond à la gestion des sites par des acteurs privés favorables à la préservation des structures :

- Réduit de Chenay : vente à un médecin fismois en 1935 et rachat par une propriétaire dans les années 1990, laquelle autorise l'occupation partielle du fossé par un centre équestre et créant un logement dans l'aile gauche du casernement (fig. 6.32E).

- Fort de Saint-Thierry : propriétaires privés pendant la seconde moitié du XXe siècle puis acquisition par la commune (Pouillon) et valorisation patrimoniale et mémorielle par l'Association des forts de Saint-Thierry et Brimont (fig. 6.32A).

(iii) La troisième concerne enfin la trajectoire unique du fort de la Pompelle, seul fort repris par l'armée française pendant la Grande Guerre. Il est valorisé dès le début des années 1920 par les acteurs touristiques (Guide Michelin « *Reims et le fort de la Pompelle* » de 1920, Guide-Historique Jivé de la Marne de 1925) et les pouvoirs publics, via son classement comme monument historique en 1922, qui aboutit à sa muséification en 1972. Dans les années 1990, le musée du fort de la Pompelle entreprend de lourds travaux de réfection et d'étanchéification du casernement ayant pour beaucoup remanié le massif central (fig. 6.33). Cette trajectoire constitue ainsi un bon exemple de requalification fonctionnelle pouvant entraîner un effacement partiel, expliquant la faible densité de cratères d'obus malgré sa première position pendant la Première Guerre mondiale (fig. 6.25C).

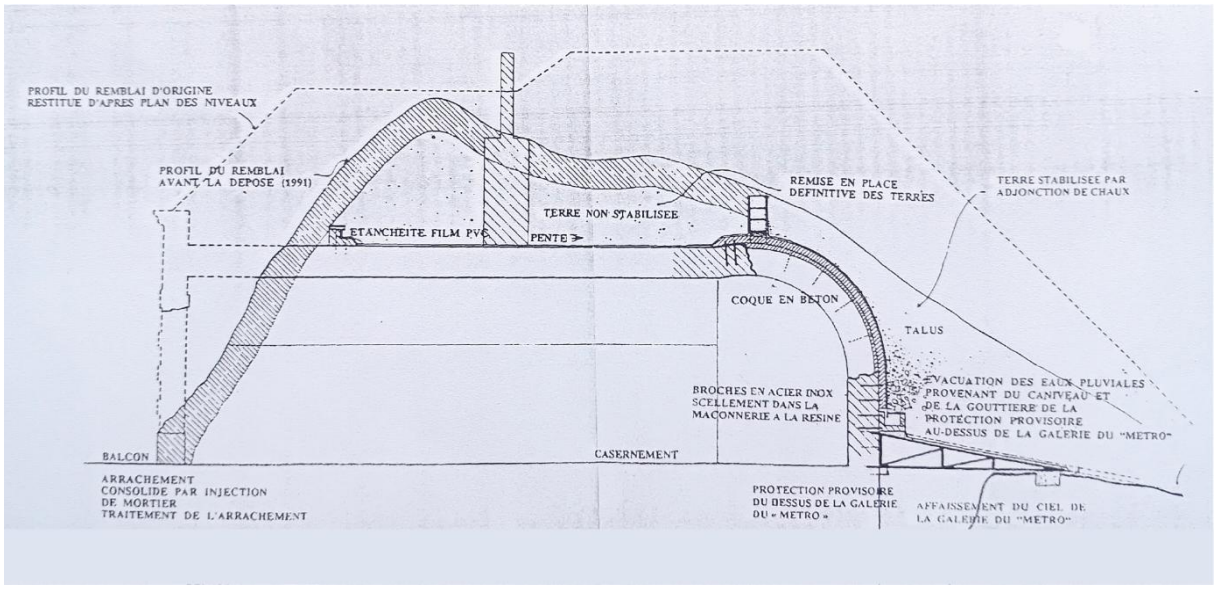


Figure 6.33 : Coupe transversale du projet de remise en place des remblais après la consolidation du plafond du casernement (réalisation Pierre-Antoine Gatier, architecte en chef des monuments historiques ; source : Fonds Fouqueray).

6.1.3.2. Requalification foncière

À l'inverse, les taux d'effacement les plus élevés, observés pour les polémoformes du G1, sont directement liés à une réaffectation précoce des terrains, souvent au détriment des structures fortifiées.

À l'exception de la batterie de Berru (h), ces sites présentent un remaniement topographique, incluant des phénomènes de nivellement, entraînant une forte FCC du P1 dans les distributions des valeurs de pente des remparts et fossés (56,6-84,4 %), au détriment des FCC P2 et P3 (fig. 5.17A-B). Cela s'observe par exemple à la faveur du développement d'activités ludiques destructrices pour la batterie de Loivre (c) et le fort de Fresne (f ; circuits tout-terrain) ou découle d'un usage militaire actuel, comme la vigie de Berru (i), dont le terrain est arasé pour accueillir centre de télécommunication exploité par l'armée (fig. 5.13I).

Au fort de Witry-lès-Reims (g), la comparaison des acquisitions LIDAR de 2015 et 2023 met en évidence un effacement topographique progressif, caractérisée par l'arasement du rempart, et à l'inverse, le comblement des concavités avec des déchets de construction (fig. 6.34A-D), qui impliquent aujourd'hui des risques de pollutions sanctionnés par la justice[22].

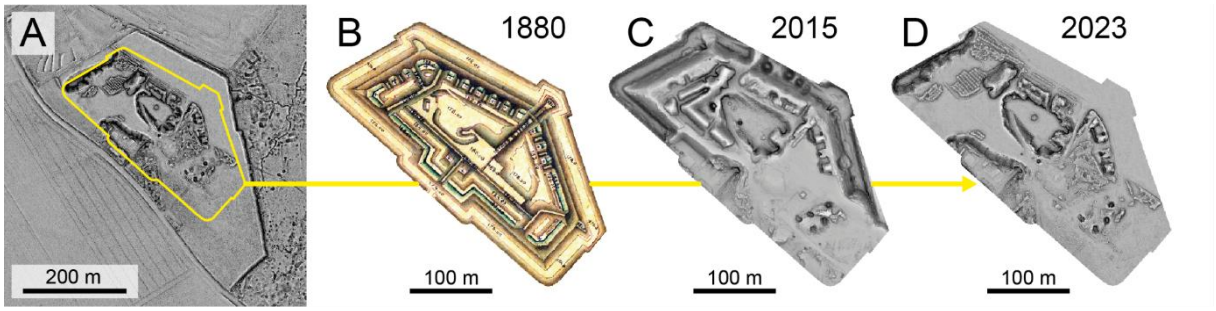


Figure 6.34 : Évolution du comblement du fort de Witry-lès-Reims (les vignettes A, C et D correspondent à un MNT traité visuellement par superposition par transparence de l'indice de pente et du LRM). A et D : LIDAR HD IGN (2023) ; B : Plan du fort (Ministère de la Guerre, 1880) ; C : LIDAR IMPACT 14-18 (2015).

[22] https://www.marne.gouv.fr/contenu/telechargement/33777/210472/file/AP%20n%C2%B0%202021-MD-171-IC%20avec%20Annexe.pdf

6.1.3.3. Prélèvement de géomatériaux cohérents

Un autre processus majeur, étroitement lié au remodelage topographique et à la construction maçonnée de ces fortifications, concerne le démantèlement des pierres de taille (éléments de maçonnerie de moyen et grand appareil) en vue de leur remploi. Au-delà de la perte de composants architecturaux, ce processus a un impact direct sur la morphologie, la suppression des murs de soutènement et des éléments porteurs modifiant la stabilité des pentes et contribuant à la transformation du relief. Ce phénomène affecte, à des degrés variables, la quasi-totalité des forts de la ceinture fortifiée de Reims, à l'exception notable du réduit de Chenay (fig. 5.13A) et du fort de Montbré (fig. 5.13L, 5.17A-B).

Pour les forts du groupe G1, l'extraction de matériaux concerne presque l'ensemble des substructures, qu'il s'agisse de sites réaffectés et fortement remaniés (*e.g.*, fig. 5.13C, F, I) ou de sites abandonnés mais encore lisibles morphologiquement (*e.g.*, la batterie de Berru, fig. 5.13H). Ce démantèlement contribue aux faibles valeurs de rugosité observées dans le RgI (tab. 5.5) et à l'absence du P3 dans les distributions statistiques des valeurs de pente (fig. 5.17A-B). Cette absence s'explique principalement en raison de la régularisation des talus du fossé suite à la disparition des murs de soutènement, lorsqu'ils ne sont pas remodelés par des activités humaines ultérieures.

Dans les forts du groupe G2, les prélèvements en géomatériaux, plus localisés, ciblent le plus souvent des éléments spécifiques, telles certaines façades (*e.g.*, casernement du fort de Brimont ; fig. 5.54C), les murs d'escarpe et de contre-escarpe (fort de Nogent-l'Abbesse, ce qui explique l'absence du P3, fig. 5.35M-P), ou des sous-structures partielles, parfois entièrement démontées (*e.g.*, moitié du casernement et la caponnière double du fort de Saint-Thierry, fig. 5.54D-E, ou le casernement du fort de Witry-lès-Reims).

Bien qu'aucune documentation directe relative à la réutilisation des pierres issues de ces forts n'ait été identifiée, il est plausible d'établir un lien avec la décennie de reconstruction suivant la Première Guerre mondiale (Taborelli, 2018), période identifiée comme la quatrième grande phase de remploi des géomatériaux dans l'histoire du Pays rémois (Fronteau et al., 2014). Par ailleurs, les contrastes colorimétriques sur une photographie aérienne de 1949 suggèrent un démantèlement des substructures du fort de Saint-Thierry survenu après la Seconde Guerre mondiale, plutôt que pendant l'entre-deux-guerres (fig. 6.35A).

6.1.3.4. Autres modifications et destructions liées à la guerre

Venant s'ajouter aux destructions liées à la Première Guerre mondiale (*cf.* partie 6.1.2), d'autres modifications, bien que moins significatives, liées à la militarisation ou à la guerre, ont contribué à l'effacement des reliefs fortifiés. Il s'agit par exemple de la réutilisation des

sites comme des centres de détention, tel qu'au réduit de Chenay, où les Américains détiennent des collaborateurs à la fin de la Grande Guerre, ou qu'au fort de Brimont, où des grilles encore en place dans la galerie capitale attestent de cette fonction.

Les impacts les plus importants sont relatifs à la préparation et aux combats liés à la Seconde Guerre mondiale. Des bombardements de Stuka sont par exemple mentionnés aux forts de Witry-lès-Reims et Brimont[23], ce qui invite à relativiser légèrement l'inventaire des cratères d'obus relevés sur ce dernier et à suspecter un cratère de bombe à l'arrière du casernement (fig. 6.25A).

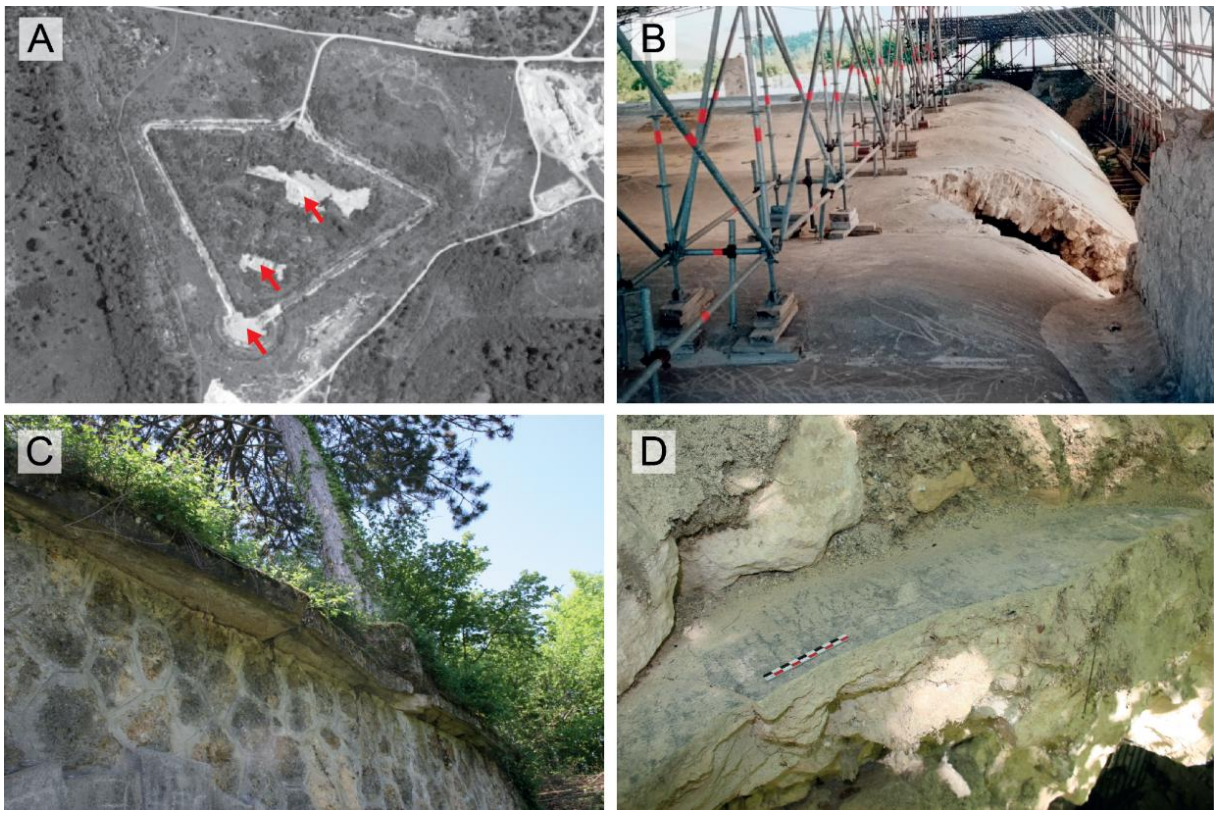


Figure 6.35 : Photographies relatives aux facteurs d'effacement des polémoformes Séré de Rivières. A : Sites d'extraction vraisemblables (flèches rouges) au fort de Saint-Thierry (photographie IGN de 1949 ; BD ORTHO® Historique, 2016) ; B : Sommet du casernement du fort de la Pompelle dépourvu du massif de terre pendant les travaux réalisés dans les années 90 (cliché : Bernard Fouqueray) ; C : Pierres de corniche d'une façade de traverse-abri désolidarisées par les racines d'un pin ; D : Exemple de couche cimentée imperméable disposée entre les voûtes des substructures et le massif de terre sus-jacent.

Le cas le plus visible est le fort de Nogent-l'Abbesse, où l'impact militaire postérieur à la Première Guerre mondiale concerne, à la veille de la Seconde Guerre mondiale, l'implantation de 27 cellules de stockage souterraines de munitions liées à la BA 112 (1935-1939 ; Coutant et al., 2017 ; fig. 6.36A-B). Celles-ci sont construites sur le flanc septentrional

[23]https://www.criticalpast.com/video/65675021841_Battle-of-France_burning-ruins_Notre-Dame-de-Reims_Fort-Brimont-ruins_panzer-divisions

de la butte, en contrebas du glacis du front de gorge. Des couloirs reliant les soutes trois par trois, ainsi que des alvéoles placées face à l'entrée, servent à casser le flux d'explosion en cas de bombardement.

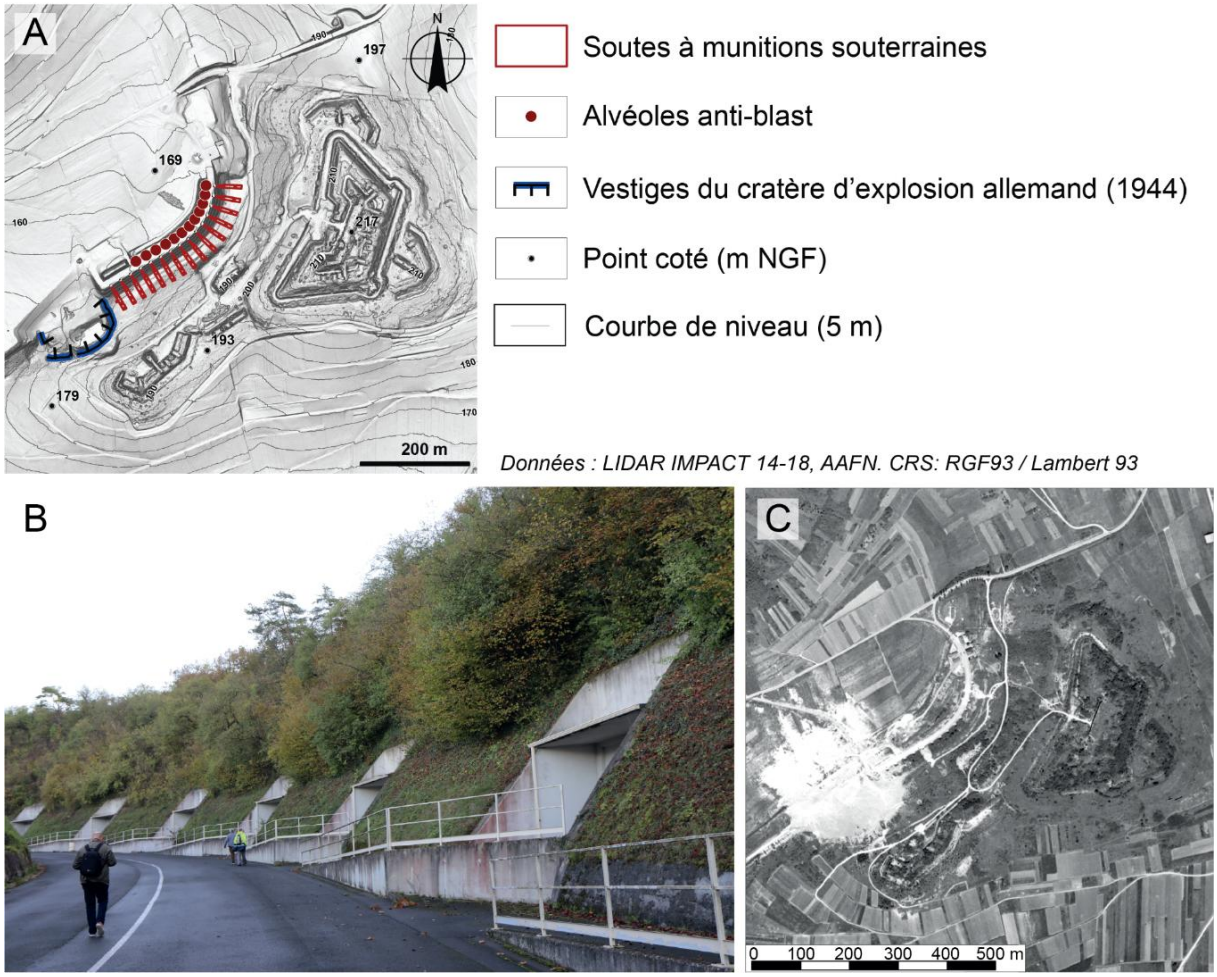


Figure 6.36 : Exemple de modifications militaire et polémologique postérieures à la Première Guerre mondiale au fort de Nogent-l'Abbesse (1937-1944). A : MNT LIDAR (IMPACT 14-18, 2015) traité visuellement (indice de pente) ; B : Voie d'accès aux soutes à munitions enterrées (à droite) créées par l'armée française entre 1935 et 1939 (cl : A. Devos) ; C : Cratère de l'explosion des soutes à munitions (1944) révélant le substrat crayeux sous-jacent (photographie aérienne IGN de 1949 ; BD ORTHO® Historique, 2016).

En 1944, les troupes allemandes minent les 15 soutes orientales, dont trois seront reconstruites par la suite (Frinjs et al., 2008 ; Coutant et al., 2017). Cette destruction génère un cratère d'une centaine de mètres de diamètre et des éjectas crayeux, encore nettement repérables en photographie aérienne en 1949 (fig. 6.36C). Les images LIDAR témoignent d'un réaménagement du cratère après la Seconde Guerre mondiale (nivellement des verses, terrassement ; fig. 6.36A).

6.1.3.5. Bioérosion

De même que ces processus anthropiques (remaniement topographique, démantèlement, guerre), la détérioration naturelle affecte à la fois les structures maçonnées et le relief des fortifications. Sur les structures maçonnées, elle résulte de l'action combinée de plusieurs processus érosifs, tels que la bioérosion, la gélifraction et l'érosion hydrique (notamment après infiltration ; Durup de Baleine, 1998). En l'occurrence, la modération de l'érosion par la couverture végétale ne peut jouer qu'un rôle limité sur les massifs de terre de ces méga-polémoformes n'existant que depuis 150 ans. L'activité bioérosive est induite dès la construction des fortifications, par l'implantation d'une végétation défensive (fig. 2.22 ; tab. 2.2 ; *cf.* partie 6.1.1.2) et se prolonge jusqu'à aujourd'hui par l'existence de peuplements forestiers pluristratifiés en libre évolution, hérités de ces plantations militaires initiales. L'érosion s'effectue en particulier par l'intermédiaire d'une végétation interstitielle dont le système racinaire s'engouffre dans les anfractuosités des maçonneries. Elle peut correspondre aussi bien à des pins (*Pinus sp.*) enracinés sur le massif de terre (fig. 6.35C), par exemple capable de déchausser des éléments de corniches, qu'à des capillaires des murailles (*Asplenium trichomanes quadrivalens*) prospérant à même les murs des fossés (Decoq et al., 1996 ; *cf.* partie 6.1.4.3).

6.1.3.6. Gélifraction et infiltration

Le secteur de Reims, bien que soumis à un gel moins intense que les régions situées plus à l'est (Massif vosgien et cuestas de la Lorraine sédimentaire), est par ailleurs marqué par une désagrégation mécanique des matériaux sous l'effet du gel-dégel. Ce phénomène est amplifié par l'utilisation de roches calcaires poreuses, comme les calcaires à Milioles et à *Campanile Giganteum* (Lutétien) des plateaux tertiaires à l'ouest de Reims, ou les calcaires à entroques de type « Euville » (Oxfordien supérieur) provenant du sud meusien (*cf.* partie 6.1.1.1). Le délabrement des structures favorise enfin l'infiltration de l'eau, contribuant à une érosion hydrique qui exacerbe la gélivité des pierres de construction. Les destructions causées par les conflits aggravent ces effets en perturbant le cycle interne de l'eau dans les ouvrages fortifiés dont la gestion a été anticipée dès leur conception, notamment par l'installation d'une couche cimentée imperméable entre les voûtes des substructures et le remblai sus-jacent (fig. 6.4A-B, 6.35B, D), ou encore par la mise en place de bouches de décharge basales dans les murs maçonnés. Ces dispositifs, souvent endommagés par les conflits, ont perdu leur efficacité, augmentant la vulnérabilité des structures. Dans tous les cas, ces incidences sur la maçonnerie ne sont morphologiquement perceptibles que lorsqu'elles entraînent un effondrement qui se répercute sur la topographie. L'action de l'eau peut également entraîner des répercussions sur le déplacement de volumes de remblais, problématique évoquée dans la section suivante.

6.1.3.7. Aléa gravitaire

La détérioration naturelle intervient sur le relief, principalement par l'intermédiaire d'aléas gravitaires. Les talus bordant le fossé périphérique subissent un phénomène de régularisation comparable à celui observé sur les versants naturels (*e.g.*, Guérémy et Vejux, 1987). Ce processus est exacerbé par la disparition des murs latéraux, entraînant la perte du P3 dans les distributions de valeurs de pente et l'extension du P2. Cette régularisation favorise en parallèle une dynamique colluviale qui comble progressivement les fossés, tout en augmentant la valeur de pente du P1 (fig. 5.17A-B).

Par ailleurs, des processus pédogénétiques comparables à ceux observés dans les cratères d'obus (Hupy et Schaetzl, 2008 ; De Matos-Machado, 2018), non étudiés ici, sont susceptibles de se développer dans les zones de stagnation ou d'accumulation de l'eau au sein de ces fossés. La rétention des eaux de surface y favorise l'accumulation de dépôts organiques et les phénomènes de lessivage, contribuant ainsi à la diminution de la rugosité du relief.

En fonction des paramètres géologiques, cette régularisation peut également conduire à des mouvements de terrain d'intensité variable. Au fort de Nogent-l'Abbesse, disposé sur une butte coiffée par le Sparnacien (Yprésien), aux faciès argilo-marno-sableux réputés instables (*e.g.*, mouvements de terrain de la Montagne de Reims ; Bollot, 2014), ce phénomène est particulièrement marqué. Les données LIDAR révèlent que plus de 5 000 m², majoritairement de la contrescarpe, sur un linéaire de fossé d'environ 500 m, sont affectés par une régularisation explicite du talus (fig. 6.37A-D). En parallèle d'une régularisation relativement lente prenant la forme de coulées, de nombreux glissements de terrain sont signalés pendant la période d'activité du fort (*e.g.*, 1882-1887, 1904, 1907), au sein de cette « *[...] argile blanchâtre [...] sous l'action du dégel et de la pluie* » (Ministère de la Guerre, 1904, 1909).

Jusqu'ici, le substrat géologique a essentiellement été appréhendé comme un facteur de conditionnement multiscalaire du système de fortification, influençant le site, la forme globale voire les structures internes (Ancelin et al., 2023 ; *cf.* partie 6.1.1.3). L'influence de la géologie s'exprime ainsi également sur l'effacement des polémoformes du système Séré de Rivières, qui demeure un champ encore peu exploré, alors que les caractéristiques géologiques, telles que la porosité ou la résistance mécanique, jouent un rôle déterminant dans la préservation des morphologies associées à ces fortifications. Par exemple, un substrat meuble ou fortement poreux favorise l'érosion et le comblement progressif des formes concaves, tandis qu'un substrat plus induré et plus résistant contribue à la conservation des microreliefs convexes et limite les phénomènes de glissement ou d'érosion régressive. Ce contraste est illustré par le fort de Saint-Thierry (fig. 5.13B), où le P3 se

maintient malgré le démantèlement de plus de neuf dixièmes des murs de fossé (fig. 5.17A-B ; tab. 5.16), en partie grâce aux affleurements calcaires qui les soutiennent, voire les composent (fig. 5.16, 5.41B, 5.42A-C).

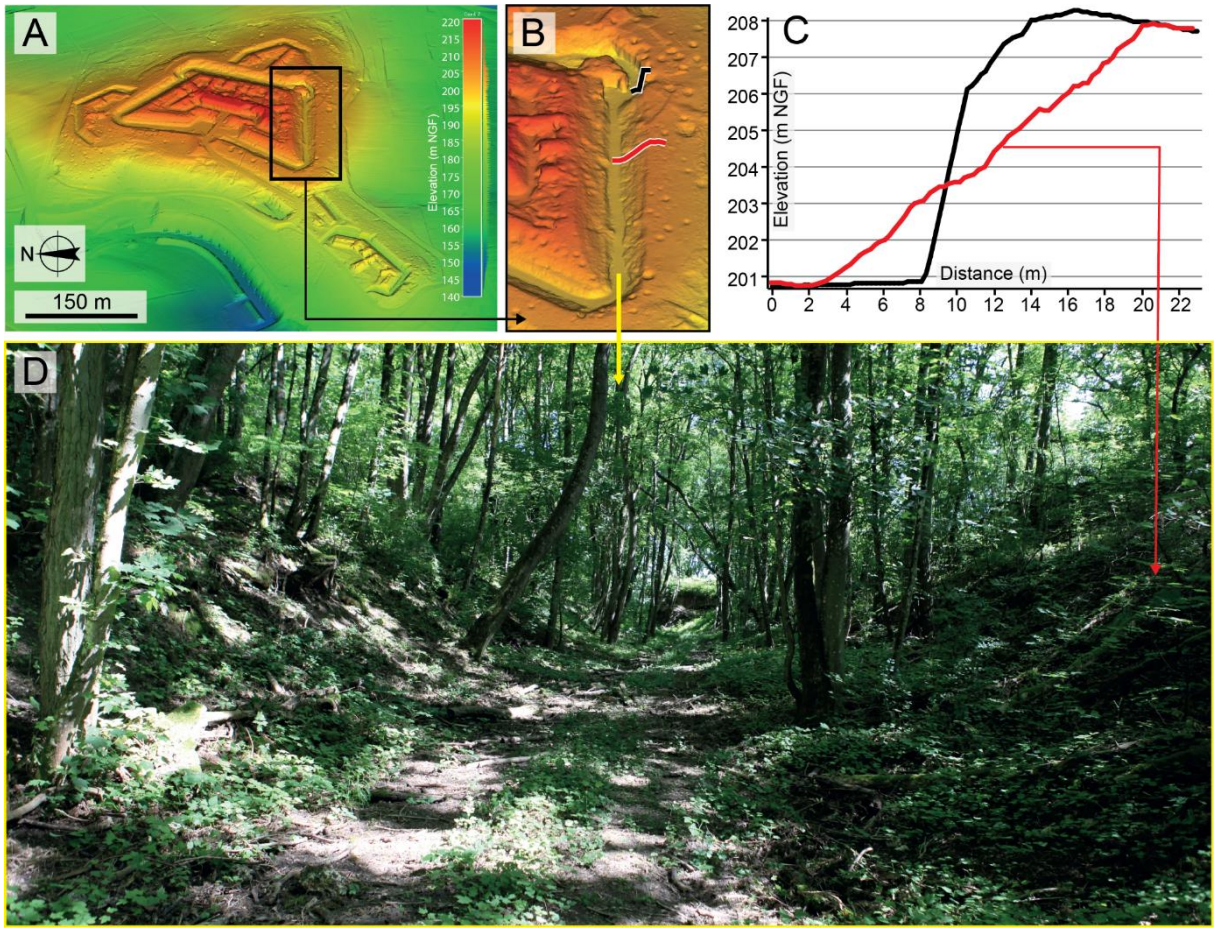


Figure 6.37 : Régularisation des pentes du fossé du fort de Nogent-l'Abbesse. A, B : MNT LIDAR HD de l'IGN (2023) visualisé en 2,5D ; C : Coupes topographiques du tronçon sud du fossé, comparant le talus de contrescarpe avec (en noir) et sans mur de soutènement (en rouge) ; D : Photographie d'un tronçon du fossé montrant des talus latéraux régularisés (cl : Alain Devos).

Par ailleurs, cette problématique soulève la question de la détermination du niveau de sol initial, permettant de distinguer le substrat naturel des remblais remaniés utilisés pour recouvrir les substructures et constituer les remblais de terre, ces matériaux présentant des comportements géomorphologiques très contrastés (fig. 5.51A-C, 6.4A-B, 6.5).

À l'échelle de la ceinture fortifiée de Reims, les résultats préliminaires suggèrent que le niveau de sol initial théorique correspond à une ligne passant entre les crêtes des murs d'escarpe et de contrescarpe, conformément aux prescriptions des traités de fortification (fig. 2.18B, 5.16A), hypothèse à la base de la modélisation des reliefs avant construction utilisée pour estimer la volumétrie (*cf.* partie 4.3.3.4.3). Cette configuration pourrait expliquer la moindre sensibilité des talus externes du fort de Nogent-l'Abbesse aux glissements de terrain (fig. 6.37A-D). La comparaison des profils topographiques des talus

de fossé met en évidence un contraste net entre les talus argilo-marneux de Nogent-l'Abbesse, plus larges et moins raides, soumis à une érosion régressive plus marquée, et ceux des autres forts principaux, qui présentent des sections de fossé dépourvues de murs, comme au fort de la Pompelle (fig. 5.15B, J-K).

Conclusion de la partie 6.1.3

Cette section a permis de mettre en relation les résultats obtenus dans l'étude de la rugosité (TRI, RIg) et de la distribution de valeurs de pente avec des facteurs et processus concourant à l'effacement des morphologies Séré de Rivières. Il est possible de faire ressortir d'une part, les forts du groupe G2, relativement bien conservés ayant bénéficié d'une réaffectation fonctionnelle des structures pouvant toutefois engendrer des perturbations. D'autre part, les forts du groupe G1 connaissent une requalification n'intervenant non pas à l'échelle du fort, mais à celle du foncier, synonyme, généralement, de démantèlement.

En définitive, les facteurs anthropogéniques, tant civils, militaires que polémologiques, apparaissent comme les plus déterminants dans l'explication de l'effacement, tandis que les facteurs naturels jouent un rôle plus marginal. En ce sens, étudier l'histoire des forts participe à la connaissance des principaux facteurs et processus d'érosion, dans la mesure où les plus impactants, à une échelle de temps si courte, sont anthropogéniques.

Pour les forts dont la structure est encore en place (groupe G2), il est ainsi probable que les spécificités structurelles propres à chaque fort influencent davantage la rugosité de terrain que les facteurs d'effacement. Cela est illustré par les indices de rugosité du fort de Brimont (RgI = 1,23 ; TRI = 0,37 ; tab. 5.5), qui sont élevés alors même que sa surface est l'une des plus marquées par les obus de la ceinture de Reims (fig. 5.13D, 6.25A).

Aujourd'hui, 150 ans après leur construction, les trajectoires de ces forts revêtent différents héritages, dont des héritages environnementaux et écologiques abordés dans la section suivante.

6.1.4. Héritages écologiques

L'étude du palimpseste topographique, révélé par le LiDAR, a permis de caractériser les héritages morphologiques associés aux fortifications Séré de Rivières. Leur dimension verticale et maçonnée autorise également l'identification d'un héritage bâti et architectural, déjà largement documenté par la littérature scientifique, comme rappelé en introduction. Cette dernière sous-partie examine de manière exploratoire les héritages environnementaux issus des trajectoires morphogénétiques décrites précédemment (*cf.* parties 6.1.1-6.1.3). Il s'agit d'interroger ce que ces polémoformes transmettent aujourd'hui au paysage sur un plan strictement physique, autrement dit la manière dont ces reliefs hérités influencent l'environnement, notamment à travers leurs implications écologiques et, dans une moindre mesure, cindyniques.

La construction des ouvrages, le recours au génie végétal, puis l'abandon de leur fonction défensive active, ont durablement modifié les conditions stationnelles et les dynamiques écologiques locales. Elle vise donc à analyser le rôle de ces reliefs anthropiques hérités dans la structuration actuelle des milieux, notamment à partir du cas du fort de Brimont. L'analyse s'ouvre par une synthèse des impacts écologiques induits par la mise en défense de la butte de Brimont, depuis la fortification permanente jusqu'aux réseaux de défense de la Première Guerre mondiale, afin de préciser l'état initial hérité sur lequel s'opère la reconquête forestière. Elle repose ensuite sur l'étude diachronique de cette reconquête à l'échelle de la butte, à partir du milieu du XXe siècle, avant de se concentrer sur la végétation actuelle du site fortifié, pour montrer comment ces reliefs fortifiés structurent aujourd'hui des conditions écologiques spécifiques. Enfin, ces observations sont replacées à l'échelle de l'ensemble de la ceinture fortifiée de Reims, avant que ne soient mentionnés succinctement certains aspects cindyniques associés à leur présence et à leur histoire.

6.1.4.1. Fortification et guerre : impacts écologiques

Les travaux menés en biogéographie, notamment par Amat (1987, 1999, 2024), Buridant (2003), ou, avec une perspective plus géohistorique, par Mathis et al. (2020), ont permis de révéler un impact majeur du fait militaire et de la guerre sur les milieux forestiers, tant sur le plan législatif que par les aménagements et les destructions qu'ils induisent. Sur la butte sableuse de Brimont, les résultats présentés dans les parties 5.2, 5.3, 6.1.1 et 6.1.2 montrent que la mise en défense du site, puis les combats, ont profondément modifié l'agro-sylvosystème traditionnel et les milieux forestiers associés. Isolés au sein de la Champagne crayeuse largement dominée par les cultures céréalières et viticoles, ces boisements correspondaient alors à une forêt relativement jeune (moins de 100 ans), dominée par des essences pionnières héliophiles et des plantations de résineux (*cf.* partie 3.2.1.4).

Les transformations opérées sont en premier lieu le fait d'un remaniement topographique considérable, concentré dans l'espace et dans le temps (fig. 6.1). À l'échelle de la butte de Brimont, les volumes déplacés, entre 1875 et 1878, sont estimés à environ 280 000 m³, dont 50 000 m³ pour la batterie de Loivre, 30 000 m³ pour celle du Cran de Brimont et près de 200 000 m³ pour le fort de Brimont (fig. 5.19, 5.20 ; tab. 5.7). Au-delà de l'emprise directe des ouvrages, la topographie environnante a également été affectée par l'installation probable des chantiers de construction (fig. 6.13A-B) et par l'ouverture de carrières destinées à l'approvisionnement en géomatériaux locaux, impliquant le percement de voies, de pistes de roulage et vraisemblablement d'un plan incliné de plusieurs centaines de mètres (fig. 5.117A-B). Ces bouleversements morphologiques ont nécessairement affecté les conditions édaphiques et géochimiques locales, et, par conséquent, les potentialités écologiques des sols. L'origine multiscalaire des pierres de construction (tab. 6.1 ; fig. 6.3), lorsque leurs caractéristiques lithologiques et pétrographiques diffèrent des conditions initiales du site, introduit une hétérogénéité édaphique supplémentaire (*e.g.*, pierres meulières siliceuses).

La Première Guerre mondiale constitue une seconde phase de perturbation environnementale majeure. La création des réseaux de défense et les combats ont engendré des impacts désormais bien documentés à des échelles régionales, en Champagne (Taborelli, 2018) comme dans le secteur de Verdun (De Matos-Machado, 2018). À Brimont, l'analyse diachronique des plans directeurs des GCTA (annexe 54) et l'exploitation des données LIDAR (fig. 5.88) indiquent une rugosité du terrain fortement accentuée et une pédoturbation marquée, en particulier liée au creusement des tranchées (*c.* 175 000 m³) et à la bombturbation (22 impacts/ha). La déstructuration des sols, leur déplacement (creusement, remblaiement) et parfois leur comblement modifient la réserve hydrique des sols (Devos et al., 2021), voire leur faciès géochimique par des contaminations métalliques (Cancès et al., 2018) ou perchloratées (Hubé, 2013 ; Cao et al., 2019). Cette modification des paramètres physiques et chimiques des sols s'inscrit dans un contexte de transformation morphologique généralisée, marqué par le fossoiement du terrain et la multiplication de dépressions fermées induites par les polémoformes, favorisant la diversité des expositions et des effets d'abri et de corridor.

Parallèlement à ces transformations physiques, la construction des ouvrages fortifiés et le recours à un génie végétal militaire ont également influencé directement les biocénoses, en particulier au droit du fort de Brimont, implanté en lisière forestière (fig. 6.6A-C). La construction du fort s'est accompagnée d'un défrichement partiel du massif boisé, modifiant le tracé et le linéaire de la lisière, ainsi que le cortège d'espèces héliophiles qui lui est associé (Husson, 2013). Après l'abandon de la fonction défensive, la persistance de plantes et d'arbres introduits dans le cadre des plantations militaires a vraisemblablement

contribué à modifier durablement le stock chorologique local, en orientant les trajectoires de recolonisation végétale de ce secteur de lisière forestière (Amat, 2024).

La butte de Brimont et son massif forestier apparaissent ainsi comme un espace particulièrement marqué par les perturbations liées aux fortifications et aux combats, ce que démontre par ailleurs les photographies d'époque (fig. 6.38).

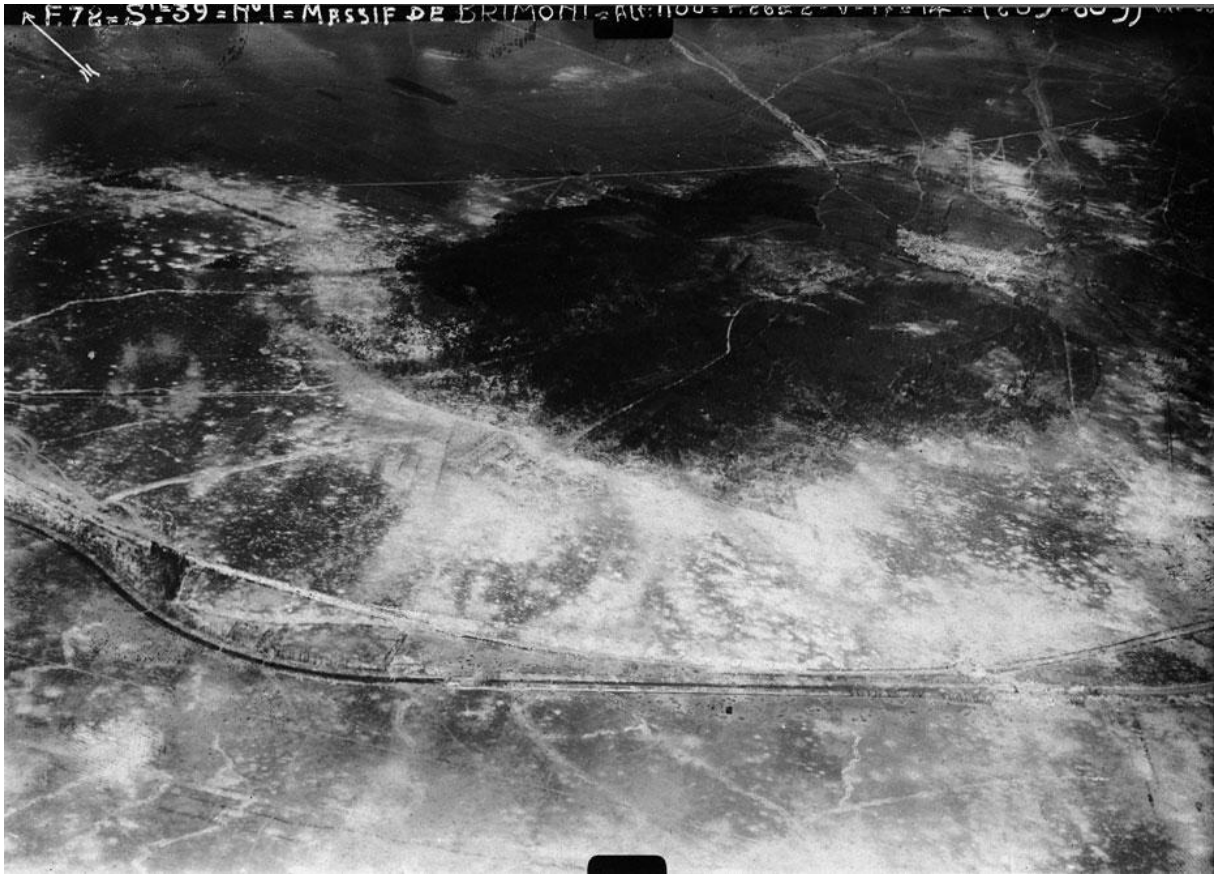


Figure 6.38 : Photographie aérienne oblique du Massif de Brimont du 12 avril 1917 Altitude de prise de vue 1 100 mètres (source : Olivier Baillon[24]).

6.1.4.2. Dynamique de reconquête forestière

Au sortir de la Première Guerre mondiale, la butte, qui fut au cœur des combats pendant quatre années (en première position à partir du printemps 1917), est intégrée à la zone rouge marnaise, couvrant 23 300 ha en 1919 et correspondant au degré de destruction le plus élevé défini par le ministère des Régions Libérées (Laval, 1927). La carte spéciale des régions dévastées de décembre 1920 indique que les habitants des villages de Courcy, Loivre et Brimont, en grande partie démolis, logent encore dans des baraquements temporaires (fig. 6.39). En revanche, malgré les dégâts considérables engendrés par les fortifications et la bombturbation, l'assise forestière se maintient. Ces terrains boisés ont probablement fait l'objet d'opérations de nettoyage menées par le Service des travaux de première urgence

[24] http://albindenis.free.fr/Site_escadrille/escadrille072.htm

(STPU), puis par le Service des travaux de l'État (STE), chargés de l'enlèvement des réseaux de défense accessoires et du désobusage des terrains (Taborelli, 2018).

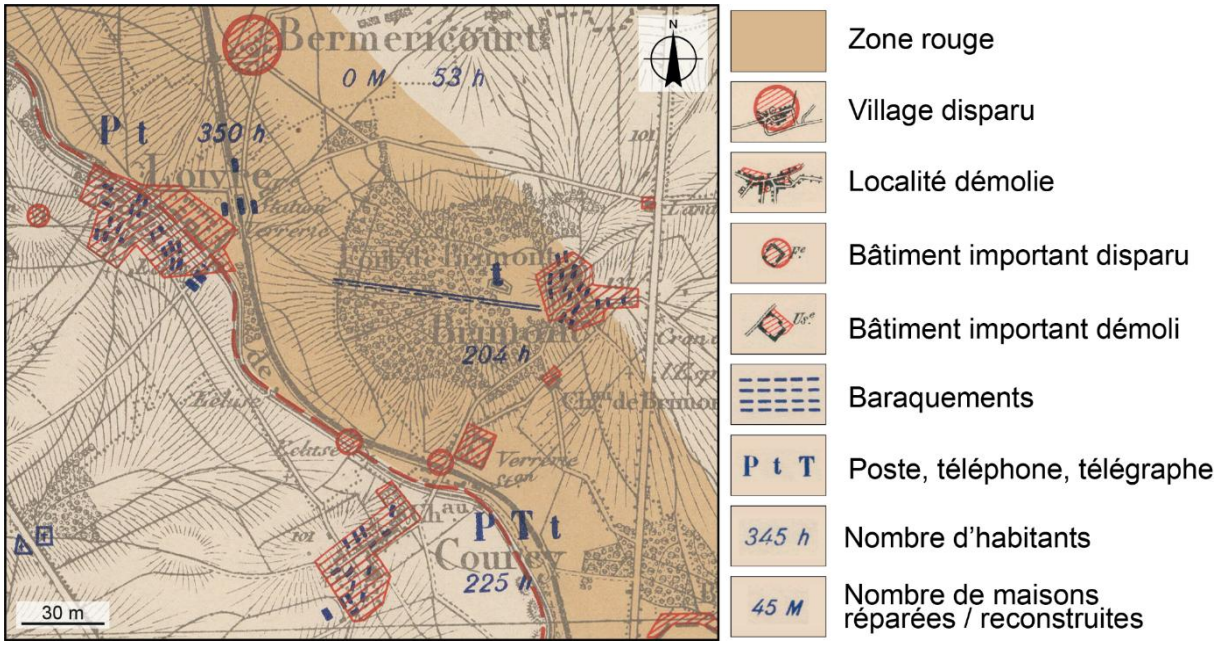


Figure 6.39 : Extrait de la feuille Reims NO de la carte spéciale des régions dévastées éditée en 1920 (source : Gallica, GE CC-698).

L'interprétation visuelle d'une série diachronique de photographies aériennes verticales permet de documenter les dynamiques d'évolution de l'occupation du sol à partir de 1949 (fig. 6.40). La frange occidentale du massif forestier, la plus proche de l'ancienne ligne de front, apparaît encore fortement dégradée par les combats de 1917-1918. Elle se caractérise alors par une couverture arborée discontinue, structurée en tâches éparses, et par une proportion importante, de l'ordre d'un quart de la surface, de formations arbustives et herbacées.

Une relique de ces formations basses persiste encore au sud du fort au début des années 1970. Leur quasi-disparition ultérieure s'explique à la fois par la reconquête forestière progressive et par le défrichement marqué de la bordure nord-ouest du massif, sous l'effet de la pression agricole caractéristique des Trente Glorieuses en Champagne (*cf.* partie 3.1.5.1 ; Chevalier, 1972). Parallèlement, le village de Brimont, sous l'effet de la périurbanisation de l'agglomération rémoise, s'étend progressivement en direction de la forêt.

Le fort de Brimont, encore largement recouvert de formations herbacées et arbustives au milieu du XXe siècle, est progressivement intégré à la dynamique forestière par un effet de lisière, jusqu'à être entièrement englobé par le couvert arboré au cours des années 1970, à l'instar des deux batteries associées, lesquelles constituent toutefois une péninsule, voire un îlot, au sein du plateau crayeux agricole (fig. 6.40).

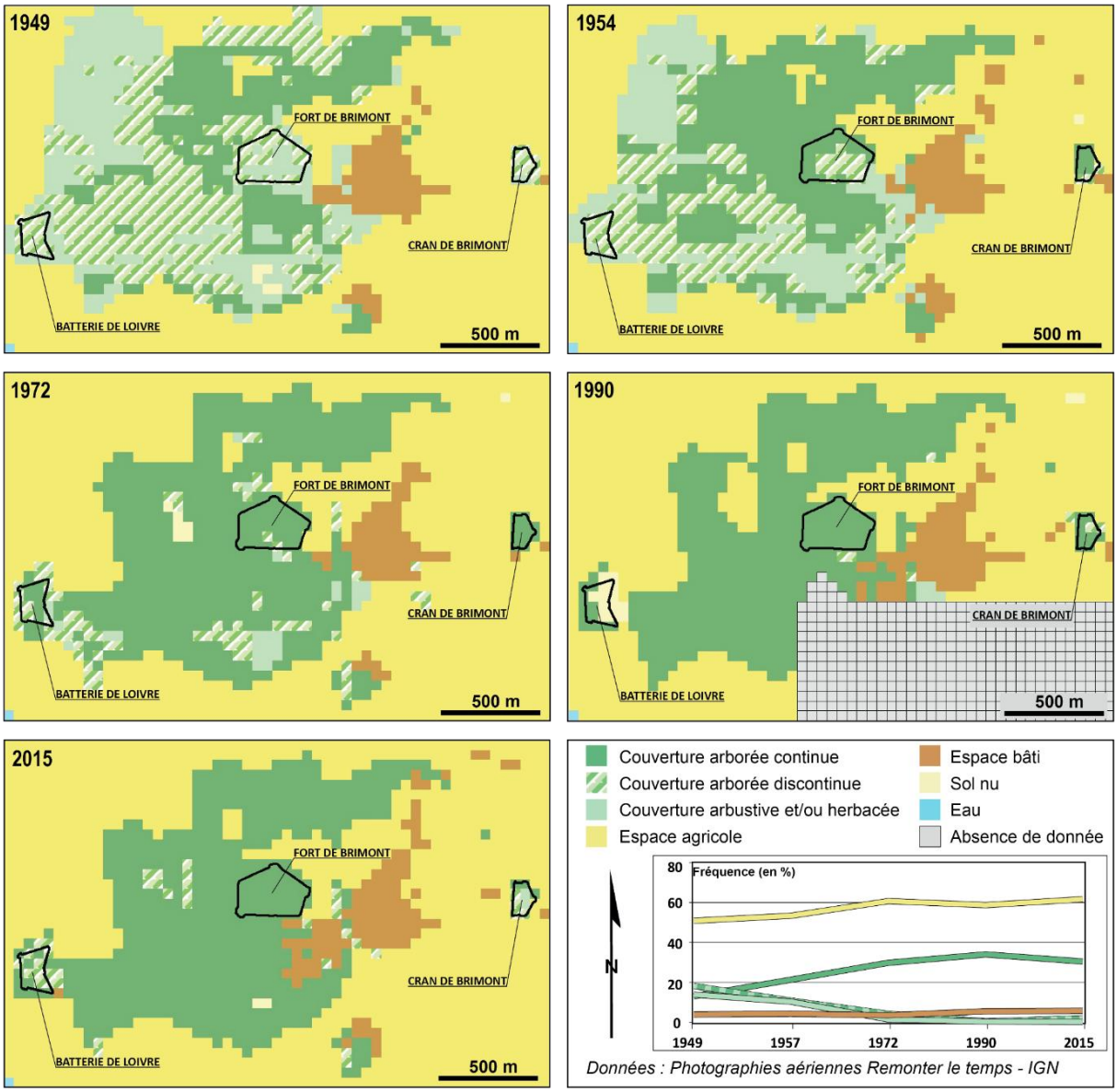


Figure 6.40 : Carte de l'occupation du sol de la butte de Brimont issue de la photo-interprétation de photographies aériennes verticales (type de sol majoritaire par pixel de 2 500 m² ; d'après la méthode de Gallet-Moron et al., 2019).

6.1.4.3. Végétation actuelle du fort de Brimont

Cette dynamique de reconquête progressive constitue le cadre dans lequel s'inscrit l'organisation végétale actuelle du fort de Brimont, ayant fait l'objet d'un relevé botanique (*cf.* partie 4.4.2 ; annexe 62). Aujourd'hui, la butte est recouverte d'une forêt caducifoliée fermée, s'implantant quasi exclusivement sur les sables thanétiens (fig. 6.41). Les peuplements forestiers, pluristratifiés, sont dominés par la chênaie-charmaie, où les trois principales essences de *Quercus* sont représentées (*Quercus pubescens, robur et petraea*). Ils sont nuancés par la présence d'un peuplement de robinier pur (*Robinia pseudoacacia*) dans la partie septentrionale, ainsi que par la présence de pins (*Pinus*) sur le flanc occidental. Ces plantations s'inscrivent logiquement sur les secteurs les plus bombturbés, au droit des

réseaux de défense allemands ciblés par l'artillerie française dans le cadre de l'offensive Nivelle de 1917 (fig. 5.88).

L'inventaire botanique confirme la juxtaposition de deux formations végétales sur sols sablo-argileux (fig. 6.42). La première prend la forme d'une forêt dont la strate arbustive haute est dominée par une frênaie-érablière sur sol neutre (neutrophile) et plutôt bien pourvu en eau (mésophile à mésohygrophile). Les essences arborées, majoritairement héliophiles à semi-sciaphiles, sont caractéristiques du stade post-pionnier du cycle sylvigénétique. Il s'agit du frêne commun (*Fraxinus excelsior*), de l'érable plane (*Acer pseudoplatanus*) et de l'érable sycomore (*Acer pseudoplatanus*), accompagnés du tilleul à larges feuilles (*Tilia platyphyllos*) et plus ponctuellement du robinier (*Robinia pseudoacacia*) ou de l'érable champêtre (*Acer campestre*).

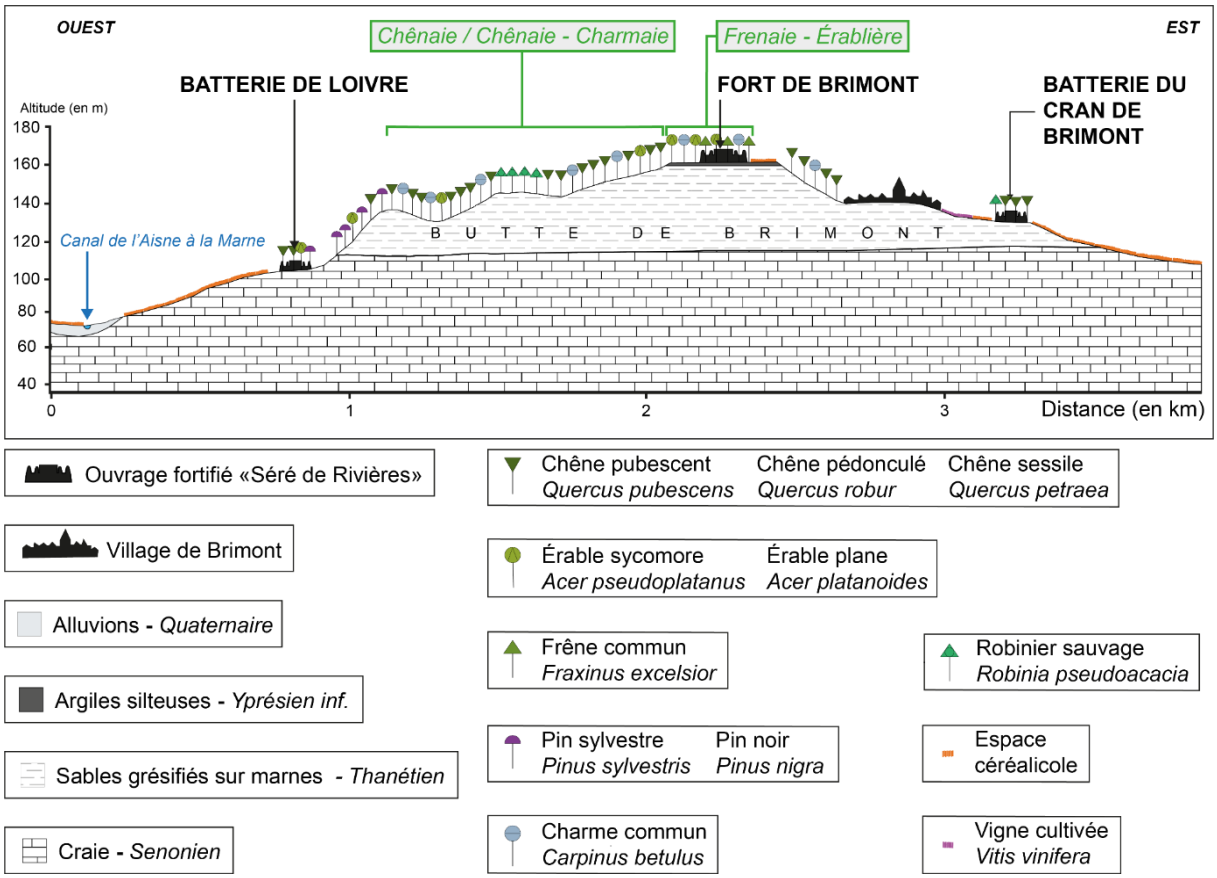


Figure 6.41 : Coupe géologique et transect de végétation de la butte de Brimont.

Les strates inférieures sont composées d'un cortège neutrophile à calcicole classique à l'image du Cerisier de Sainte-Lucie (*Prunus mahaleb*), du sureau noir (*Sambucus nigra*), de la viorne aubier (*Viburnum opulus*) dans la strate arbustive, et de la benoîte (*Geum urbanum*), de l'arum tacheté (*Arum maculatum*), de la berce sphondyle (*Heracleum sphondylium sphondylium*) ou du ray-grass commun (*Lolium perenne*) dans la strate herbacée.

Cette dernière strate est caractérisée par une pauvreté spécifique en partie liée à la présence de lierre (*Hedera helix*) et de clématite des haies (*Clematis vitalba*), plantes grimpantes générant des tapis abondants potentiellement étouffant pour les autres espèces, à l'exception notable du brachypode des bois (*Brachypodium sylvaticum*) qui est relativement épanoui.

En plus du robinier en strate arborée, les sous-bois comportent enfin des cortèges spécifiques rudéraux générés par la forte anthropisation du site. Ils se composent de nombreuses ronces (*Rubus sp.*), de l'ortie dioïque (*Urtica dioica*), du géranium herbe à Robert (*Geranium robertianum*), de la benoîte, de l'arum tacheté ou de petits ormes champêtres (*Ulmus minor*).

La seconde formation végétale est circonscrite au sein du fossé périphérique creusé plusieurs mètres en contrebas du massif de terre central (fig. 6.42). Ce corridor topographique tire parti d'un sol plus argileux et d'un topoclimat plus froid et plus humide, également entretenus par un phytoclimat induit par l'exacerbation de l'ombre par les arbres sus-jacents.

Ces conditions stationnelles particulières se matérialisent par la présence d'un cortège floristique hygrosciaphile et aéro-méso-hygrophile accompagné d'une strate muscinale variée manifeste. La strate arborée disparaît complètement au profit d'une strate herbacée très développée représentée par les Cypéracées du genre *Carex* (laîche des bois, *Carex sylvatica sylvatica*, et surtout laîche pendante, *Carex pendula*), la Circée de Paris (*Circaea lutetiana*), le polystic à soies (*Polystichum setiferum*), l'épilobe dressé (*Epilobium hirsutum*), l'oseille sanguine (*Rumex sanguineus*) ainsi que deux espèces de fougères. Sur les bordures du fossé, la scolopendre (*Asplenium scolopendrium*) s'implante préférentiellement sur les tapis d'éboulis de sables grésifiés en contrebas des affleurements, et remonte sur la partie inférieure des talus atténués ou régularisés par le démantèlement des murs du fossé et les éboulements successifs. Le capillaire des murailles (*Asplenium trichomanes quadrivalens*), capable de pousser sur des couches de terre de quelques centimètres, colonise les tronçons de murs latéraux encore en place, où elle prospère dans les anfractuosités des maçonneries. Enfin, à l'instar du massif de terre central, une multitude de jeunes érables, parfois concurrencés par des ronces, tapissent les trouées bénéficiant de davantage de lumière. Ces observations de terrain, au-delà de l'inventaire floristique, permettent de saisir la manière dont le fossé structure durablement les conditions stationnelles et orientent les dynamiques biologiques locales. La section suivante dépasse une lecture strictement descriptive pour interroger le fonctionnement écologique hérité de ces polémoformes.

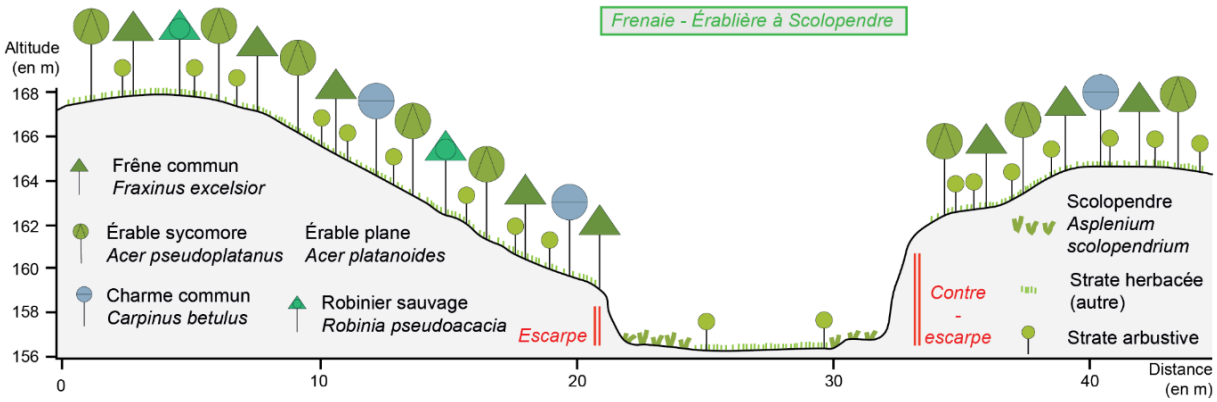


Figure 6.42 : Transect de la végétation du fossé du fort de Brimont.

6.1.4.4. Fonctionnement écologique hérité des polémoformes

L'ensemble de ces perturbations morphologiques et édaphiques a engendré une diversification durable des conditions écologiques, favorisant l'installation et le maintien de biocénoses particulières à l'échelle locale, voire régionale. Concernant la phytocénose, cette diversification s'exprime en premier lieu par le contraste arboré marqué par la frênaie-érablière, qui matérialise l'existence d'un îlot forestier au stade post-pionnier, au sein d'un contexte de chênaie-charmaie climacique dominant sur la butte de Brimont (fig. 6.41). Elle se manifeste également à l'intérieur de l'emprise fortifiée par le développement d'une végétation muscinale et de fougères denses au sein du fossé périphérique (*e.g.*, *Asplenium scolopendrium, Asplenium trichomanes quadrivalens)*, rendue possible par l'apparition de conditions stationnelles singulières à l'échelle du massif forestier, telles que la multiplication des expositions, la création de topo- et de phytoclimats contrastés, ainsi que la diversification édaphique (sols argileux, présence de pierres meulières siliceuses).

À l'instar des observations réalisées sur le fort de Mayot (Aisne ; Decoq et al., 1996), la richesse écologique de ce milieu tient dans la concentration, sur une surface restreinte, de micro-habitats aujourd'hui devenus peu fréquents dans les paysages régionaux. La juxtaposition étroite de groupements forestiers et intra-forestiers, à l'intérieur desquels s'expriment localement des cortèges rudéraux ou à caractère hygrosciaphile habituellement disjoints, confère ainsi au fort de Brimont un statut d'îlot de biodiversité, en ce sens que sa présence entretient une diversité écologique supérieure à celle du milieu forestier environnant. Sa pérennité demeure toutefois conditionnée par les dynamiques de fermeture progressive, comme en témoignent les nombreuses pouponnières d'érables observées au sein du fossé.

Les relevés botaniques réalisés sur d'autres sites fortifiés, non formalisés ici, traduisent des trajectoires écologiques contrastées, révélatrices de fonctionnements différenciés, notamment en fonction de leur position relative au couvert forestier et aux conditions environnementales initiales, comme l'illustre le fort de la Pompelle.

À l'inverse du fort de Brimont, implanté en lisière forestière, le fort de la Pompelle se situe en contexte agricole ouvert, au cœur du plateau crayeux (fig. 3.22K, 3.23B). Les résultats issus des inventaires écologiques et de la cartographie des habitats, réalisés par le Conservatoire des espaces naturels de Champagne-Ardenne (CENCA), y révèlent une biocénose dominée par des milieux ouverts calcicoles, des friches thermophiles et des pelouses sèches relictuelles, dont la persistance apparaît directement conditionnée par l'héritage morphologique des polémoformes et par l'absence de dynamique forestière spontanée (fig. 6.43). Le fort est effectivement recouvert par une fruticée et son fossé de gorge par un ourlet mésophile calcicole, alors que les structures viaires (parking, voie d'accès) sont bordées de prairies eutrophiles qui contrastent fortement avec les champs ouverts périphériques de la Champagne crayeuse.

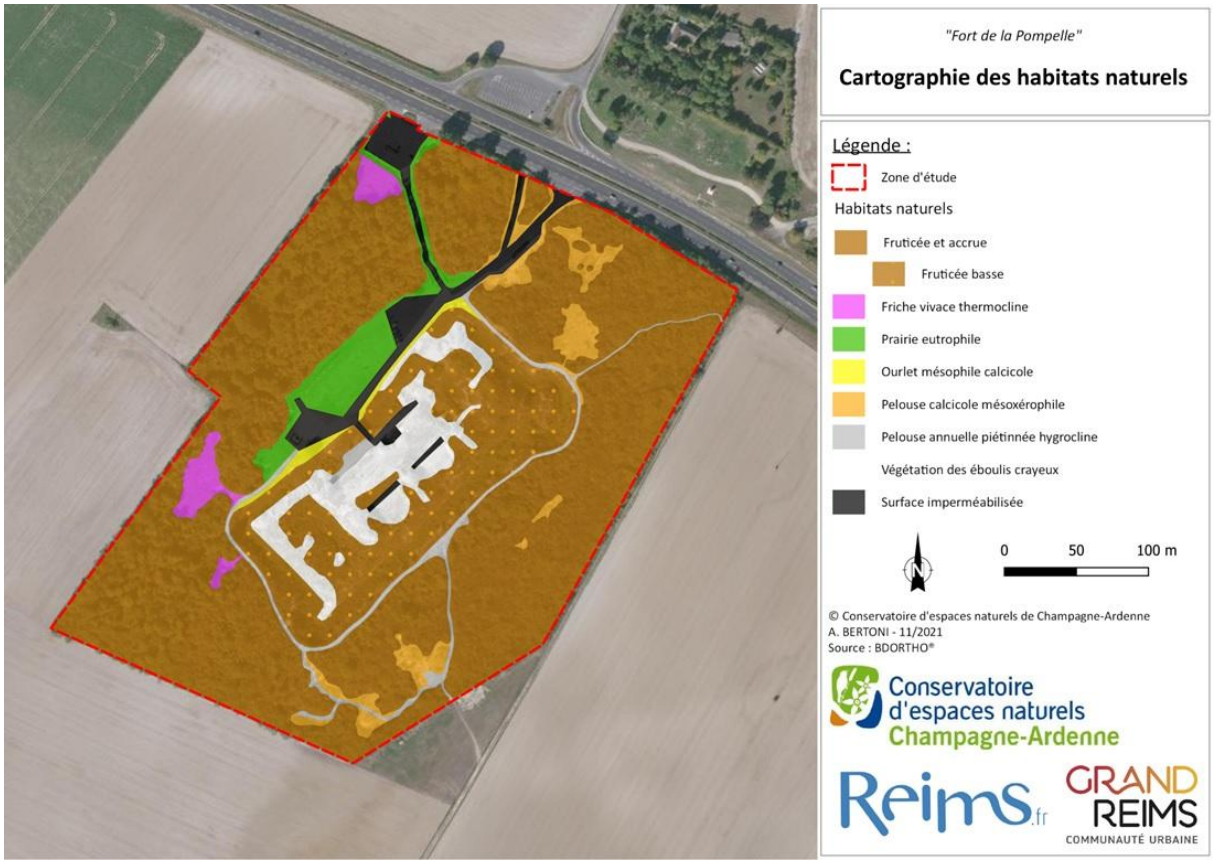


Figure 6.43 : Cartographie des habitats naturels du fort de la Pompelle (réalisation : A. Bertoni, 2021).

Ces contrastes de fonctionnement écologique, symbolisés par ces deux exemples, prennent sens à l'échelle de la ceinture fortifiée dans son ensemble, où les ouvrages agissent comme des éléments discontinus mais structurants des continuités écologiques locales. Dans les secteurs les plus ouverts et fortement anthropisés, du plateau crayeux notamment, les forts isolés de Nogent-l'Abbesse (fig. 6.44), la Pompelle et Montbré constituent des îlots boisés favorables à la biodiversité, qui n'existaient pas au préalable (fig. 3.27C-D), favorisant la connexion entre la Montagne de Reims, les forêts alluviales de la Vesle et la butte de Berru

(fig. 6.45A-C). À ce titre, elles participent à la continuité écologique au sein de paysages largement dédiés aux agro-ressources, en jouant un rôle de relais ou de corridors discontinus, comparables à des fonctionnements en « pas japonais » au sens de la Trame verte et bleue (TVB). Le fort de la Pompelle est, à ce titre, clairement identifié comme un réservoir constitutif de la trame des milieux ouverts dans les documents d'élaboration du Schéma régional de cohérence écologique (SRCE ; fig. 6.46 ; CUGR, 2017).

En l'occurrence, cette discontinuité est relative à une fragmentation écologique marquée. En effet, les corridors assurant les connexions écologiques entre les réservoirs (ripisylves, réseaux de haies, bosquets, *etc.*) sont malheureusement fragmentés par les infrastructures linéaires de transport, qui sont particulièrement concentrées dans la vallée de la Vesle (canal de la Marne à l'Aisne, autoroute A4, ligne LGV, routes départementales D944 et D33 ; fig. 6.46). Cette concentration d'axes de transport, qui souligne le site de passage et de contact de la ville de Reims dans son entonnoir de percée cataclinale (*cf.* partie 3.1.1), a des effets néfastes sur l'environnement. Elle limite considérablement la connectivité des populations animales, diminue les flux génétiques entre des populations isolées accroissant la consanguinité. Elle diminue le potentiel d'adaptation avec une diversité génétique réduite et accentue la mortalité élevée due au trafic (Dispan de Florent et al., 2025).

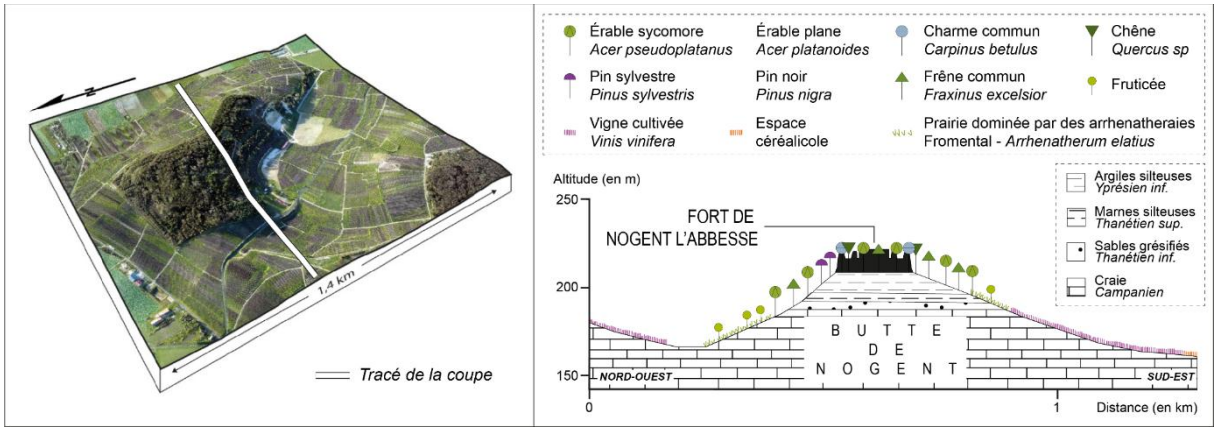


Figure 6.44 : Coupe géologique et transect de végétation de la butte de Nogent-l'Abbesse.

La présence des fortifications Séré de Rivières agit également sur la zoocénose. Par leurs murs épais et isolants, et le nombre restreint d'ouvertures, les ouvrages constituent par exemple des gîtes potentiels pour les chiroptères (*e.g.*, Grand Rhinolophe, *Rhinolophus ferrumequinum*), en particulier lorsqu'ils sont peu ou pas fréquentés dans le cadre d'usages ludiques ou touristiques.

Ces caractéristiques permettent effectivement aux chauves-souris de bénéficier d'obscurité et d'une diversité d'habitats souterrains (stabilité thermique et hygrométrique en hiver) et épigés (température élevée en été), mais aussi de terrains de chasse abondants dans les boisements alentour. Cela a notamment incité le CENCA à classer le magasin-caverne de

Berru comme site à chiroptère et à installer des grilles à l'entrée pour empêcher le dérangement des animaux. Mais la cartographie des sites d'hibernation des chiroptères cavernicoles des environs de Reims réalisée à partir des comptages hivernaux (Guiot, 1992) montre que les carrières souterraines sont largement privilégiées aux forts car ces ouvrages fortifiés et maçonnés présentent des conditions parfois trop sèches et sont trop fréquentés. Ces conditions sont par ailleurs favorables à l'existence d'une riche faune cavernicole parfois troglobie, dans des galeries pouvant héberger plus d'une centaine d'espèces, tel qu'attesté au fort de Bron, où des inventaires faunistiques ont été menés (ceinture de Lyon ; Lips, 2024).

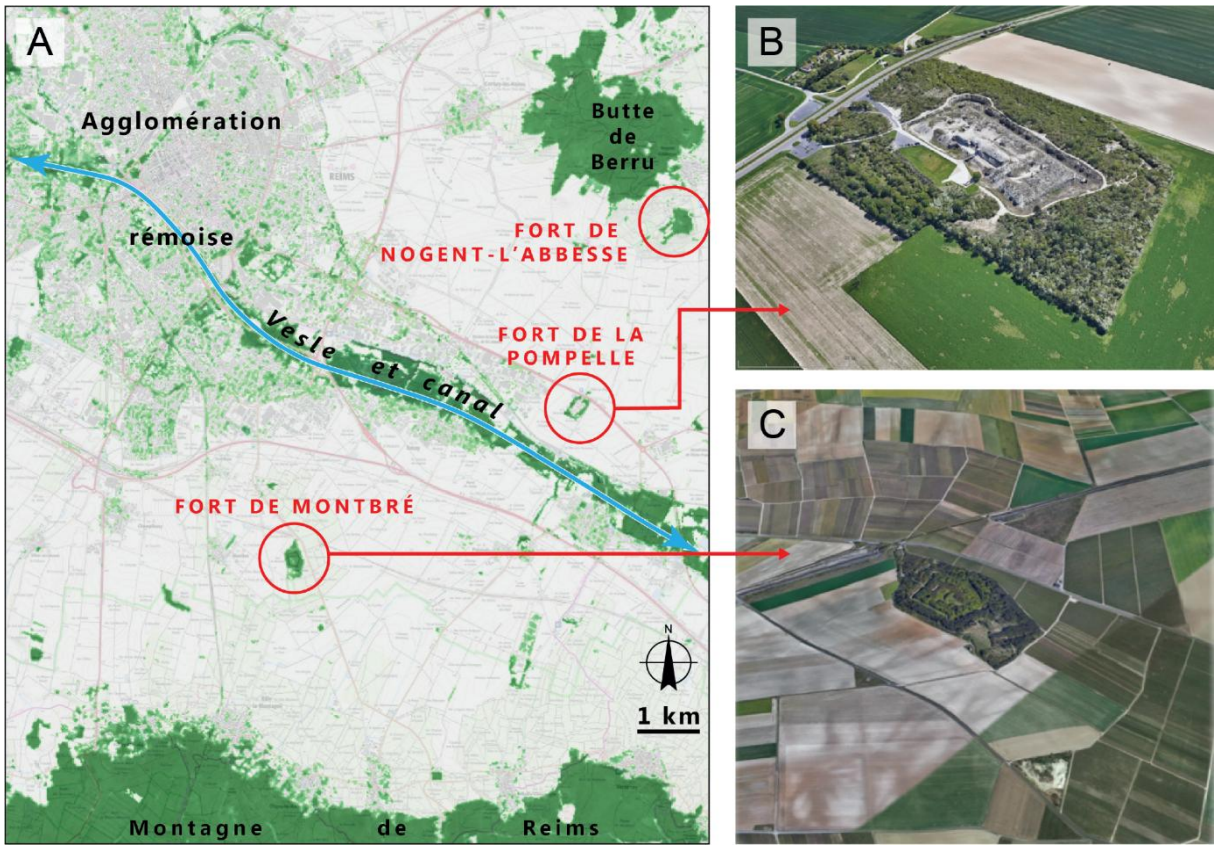


Figure 6.45 : Exemples des forts de Montbré, la Pompelle et Nogent-l'Abbesse favorisant une continuité écologique en « pas japonais » entre la butte de Berru et la Montagne de Reims. A : Taux de couverture arboré selon les données Corine Land Cover 2015 (l'intensité du vert augmente avec le pourcentage de couverture arborée, jusqu'à 100 %) ; B : Fort de la Pompelle (Airbus, 2026, visualisé via Google Earth) ; C : Fort de Montbré (Airbus, 2026, visualisé via Google Earth).

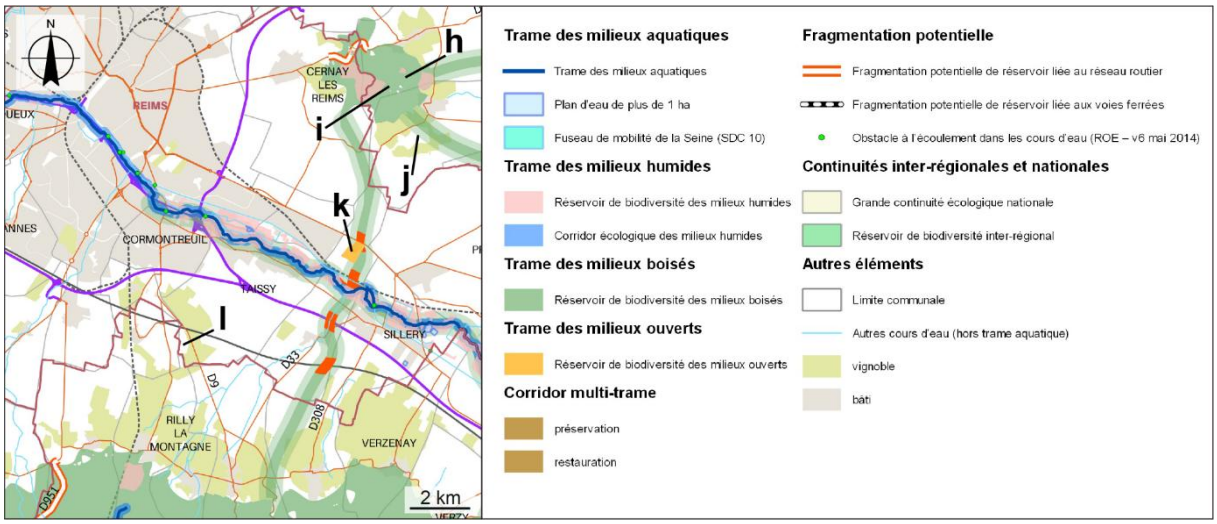


Figure 6.46 : Extrait de la carte des composantes de la trame verte et bleue de Champagne-Ardenne au 1/100 000e du Schéma Régional de Cohérence Ecologique (SRCE ; CUGR, 2017). h : Batterie de Berru ; i : Vigie de Berru ; j : Fort de Nogent-l'Abbesse ; k : Fort de la Pompelle ; l : Fort de Montbré.

6.1.4.5. Implications cindyniques et perspectives de recherches

Au-delà des dynamiques biogéographiques observées, les héritages morphologiques et souterrains des fortifications conditionnent également des aléas contemporains qui participent indirectement au fonctionnement écologique des sites. L'expansion urbaine de l'agglomération rémoise et de sa couronne périurbaine, ainsi que le développement de certaines activités civiles dans des secteurs anciennement militarisés exposent en effet à des risques de différentes natures :

- pyrotechniques, dans le cadre de munitions non explosées, alors que les forts ont pu partiellement servir de stockage de munitions pendant la Première Guerre mondiale (fig. 6.47). Les Restes Explosifs de Guerre (REG), qui représentent de véritables dangers de sécurité civile pour les activités agricoles, viticoles et forestières, sont potentiellement présents sur les sites des forts fortement bombturbés durant la Grande Guerre.

- géotechniques, liés à des affaissements et effondrements liés aux cavités militaires (substructures des forts, tunnels, sapes) et à la stabilité des terrains artificiels dans le cadre de l'aléa gravitaire. En perspectives, des prospections et topographie souterraines réalisées au LiDAR terrestre Leica BLK sur ces cavités (*e.g.*, tunnel « métro » au fort de la Pompelle, abris du bois de Brimont) permettraient de caractériser les risques associés à l'aléa « cavités » et d'améliorer l'interprétation des morphologies de surface inhérentes à ces risques (*e.g.*, entonnoir d'obus ou de crevaison de fontis).



Figure 6.47 : Dépôt d'obus dans les remblais au fort de Nogent (cl : Sébastien Laratte).

- hydrogéologiques, via notamment la vulnérabilité de la nappe de la craie aux contaminations d'origine militaire ou civiles postérieures, comme l'illustre l'entrepôt de déchets de construction sans surveillance des eaux souterraines au fort de Witry-lès-Reims (fig. 6.34A-D ; *cf.* partie 6.1.3.2). Les contaminations potentielles concernent essentiellement les composés nitroaromatiques des charges explosives des obus avec des occurrences d'ions perchlorate (ClO4-), des ergols solides et déchets de production du TNT (2,4,6-trinitrotoluène, Hubé, 2024). Dans le secteur de Reims, les perchlorates sont clairement identifiés dans les eaux de la nappe de la craie (Cao, 2020) et plus particulièrement sur les anciens sites de déminage (butte de Moronvilliers). Un suivi et des mesures physicochimiques de la nappe de la craie autour des forts permettraient de caractériser une éventuelle contamination.

- les risques de contamination des sols concernent potentiellement les forts inscrits dans les réseaux de défense de la Grande Guerre et surtout ceux qui auraient fait l'objet de traitement de désobusage (Hubé, 2024, Saint Hilaire, 2024). Le projet HERSOL (GEGENA, en cours) tente de caractériser les effets de la bombturbation sur la déstructuration physique des sols mais aussi les contaminations en ETM (plomb, cuivre, zinc).

Ces contraintes, héritées des polémoformes et de leurs usages post-conflit, influencent durablement les modalités d'aménagement et de gestion des espaces concernés, contribuant *de facto* au maintien de certains milieux peu anthropisés.

Conclusion de la partie 6.1.4

Cette étude suggère l'existence d'enjeux écologiques spécifiques associés aux milieux naturels durablement marqués par la militarisation et la guerre, en particulier dans le cas des fortifications Séré de Rivières. Certains ouvrages ont d'ores et déjà fait l'objet de dispositifs de protection, tels que des classements en ZNIEFF ou Natura 2000 (*e.g.*, fort de Saint-Thierry ; annexe 63), soulignant la reconnaissance institutionnelle de leur valeur environnementale.

Cette reconnaissance environnementale vient ainsi s'articuler à un ensemble de dispositifs de protection et de valorisation déjà existants, relevant d'autres registres patrimoniaux et réglementaires. La vigie de Berru et sa batterie s'intègrent par exemple dans un site répertorié à l'Inventaire national du patrimoine géologique (INPG), de même que le fort de la Pompelle est classé Monument historique depuis 1922.

Les études portant sur les phytocénoses des fortifications restent toutefois peu nombreuses, alors même qu'elles présentent un réel intérêt pour la compréhension des dynamiques végétales propres à ces milieux anthropisés et rudéraux (Decoq et al., 1996), situés à l'interface entre héritage militaire, contraintes géomorphologiques et processus écologiques contemporains. À l'échelle de la ceinture fortifiée de Reims, cette question revêt une importance particulière en raison de la forte variabilité des contextes géologiques, géomorphologiques et forestiers des sites d'implantation des forts. Les contrastes lithologiques et structuraux, hérités notamment des variations latérales de faciès et de puissance géologique liées au paléo-rivage du Paléogène supérieur (fig. 3.5), contribuent aujourd'hui à une diversité de paramètres édaphiques qu'il convient toutefois de relativiser au regard du caractère profondément remanié des terrains fortifiés.

Par ailleurs, les trajectoires de (re)végétalisation post-conflictuelle diffèrent sensiblement selon la situation paysagère des ouvrages (fig. 3.22A-L), notamment du fait des différences dans les stocks chorologiques (Amat, 2024) : forts intégrés à un massif forestier continu (vigie et batterie de Berru), ouvrages implantés en lisière forestière (Brimont, Chenay, Saint-Thierry, batterie de Loivre) ou fortifications isolées au sein d'espaces agricoles ouverts (Pompelle, Montbré, Witry-lès-Reims, Nogent-l'Abbesse, Fresne).

Ces fonctions écologiques procèdent directement de l'héritage morphologique des fortifications et polémoformes de la Grande Guerre, lequel structure les dynamiques de végétalisation, la diversité des habitats et la persistance de milieux refuges. Elles confèrent, ainsi, aux fortifications Séré de Rivières une valeur environnementale excédant leur seule dimension historique ou architecturale.

La militarisation de l'espace fragmente le massif forestier et modifie sa structure et sa composition, en multipliant les interfaces écotoniques de type lisière, structurées en manteaux arbustifs et en ourlets herbacés. Pour préparer et faire la guerre, la forêt est altérée, voire détruite, mais elle est aussi théorisée et utilisée (Amat, 2024). De façon antinomique, elle est aujourd'hui affiliée à la résilience écologique et territoriale de cet héritage fortifié et polémologique.

6.1.5. Limites méthodologiques

L'analyse morphogénétique des polémoformes Séré de Rivières de Reims repose principalement sur l'exploitation des signatures morphologiques, révélées par les données LiDAR aéroportées. Si cette approche permet une lecture fine des formes, de leur organisation spatiale et de leurs trajectoires d'effacement, elle demeure intrinsèquement conditionnée par la nature même de l'information observée, correspondant à un état morphologique hérité, résultant de la superposition de phases de transformations postérieures.

Plusieurs limites méthodologiques découlent de ce constat. La principale tient au risque de confondre une morphologie récente avec une morphologie d'origine. Les phases de construction, d'adaptation, de destruction liées aux conflits, puis de démantèlement ou de nivellement postérieurs, ont produit un palimpseste morphologique complexe, dont le LiDAR ne restitue que l'état final (fig. 5.13A-L). La reconstitution des trajectoires morphologiques impose ainsi un recours systématique aux sources archivistiques manuscrites et cartographiques et/ou au terrain, sous peine de confondre des formes de genèse distinctes mais morphologiquement proches, comme l'illustrent la double origine des cratères d'obus (*cf.* partie 6.1.3.4) ou les terrassements contemporains (fig. 5.59A-F). Le cas du casernement du fort de la Pompelle, dont les travaux effectués dans les années 1990 ont bouleversé le massif central sommital, illustre particulièrement bien ce risque (fig. 6.33). Sur le champ de la Première Guerre mondiale également, la comparaison des données LiDAR HD avec la réalité observée lors de prospections pédestres permet de détecter des fausses polémoformes sur le glacis du fort de Montbré, où des tranchées ont été récemment creusées à des fins de reconstitution historique (fig. 6.48A-C).

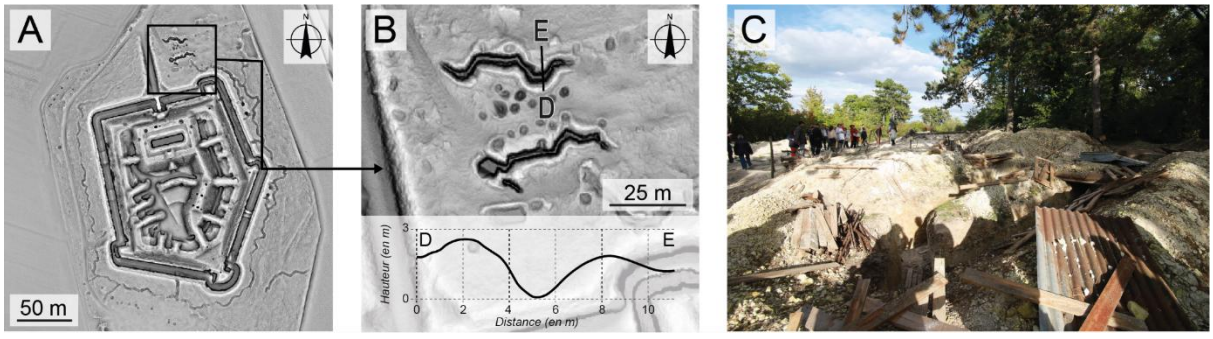


Figure 6.48 : Ensemble de tranchées de reconstitution historique situées sur le glacis du fort de Montbré. A : MNT LiDAR HD (2023) du fort de Montbré traité visuellement (pente + LRM en transparence) ; B : Agrandissement sur l'ensemble de tranchées ; C : Visite des tranchées reconstituées lors des tranchées lors des Journées Européennes du Patrimoine 2022 (cl : Alain Devos ; 18 septembre 2022).

En second lieu, les données LiDAR aéroportées se révèlent peu opérantes pour documenter la dimension verticale et interne des fortifications, pourtant centrale dans la morphogenèse

des forts Séré de Rivières. Les substructures maçonnées, les volumes souterrains, les dispositifs hydrauliques ou les états de conservation des maçonneries échappent largement à cette approche. Il en résulte une dissociation partielle entre la lisibilité morphologique des formes en surface et leur réalité structurelle, qui ne peut être comblée que par la prospection de terrain, l'étude des géomatériaux, l'analyse des archives techniques et, ponctuellement, le recours à des méthodes géophysiques ou à du LiDAR terrestre (fig. 4.50 ; *cf.* partie 6.1.1.1).

Enfin, l'analyse morphologique est confrontée à une limite taphonomique forte concernant les formes effacées ou comblées. Ces dernières peuvent être attestées par les archives sans laisser d'empreinte morphologique exploitable, comme l'illustrent les galeries effondrées, les tranchées (Devos et al., 2021) ou les cratères de mine remblayés (fig. 6.49A-C). Ce cas de figure est notamment effectif aux forts de Brimont (fig. 6.6A, 6.49C) et de Witry-lès-Reims (fig. 6.7A, 6.49A-B), où des exercices impliquant l'explosion de dizaines de mines de profondeur plurimétrique à décamétrique se déroulent sur le glacis du front de tête, en avant de la caponnière double. À l'inverse, certaines formes se maintiennent préférentiellement en fonction de leur géométrie, de leur volume et de leur contexte d'occupation, ce qui induit un biais de conservation devant être pris en compte dans l'interprétation morphologique.

Ces limites permettent de rappeler le champ de validité de l'approche morphologique par LiDAR. Elles confirment que cette méthode exprime pleinement son potentiel lorsqu'elle est mobilisée comme un outil d'analyse des signatures de surface, intégrée à une démarche interdisciplinaire croisant géohistoire, géomorphologie, biogéographie, archéologie du bâti et écologie.

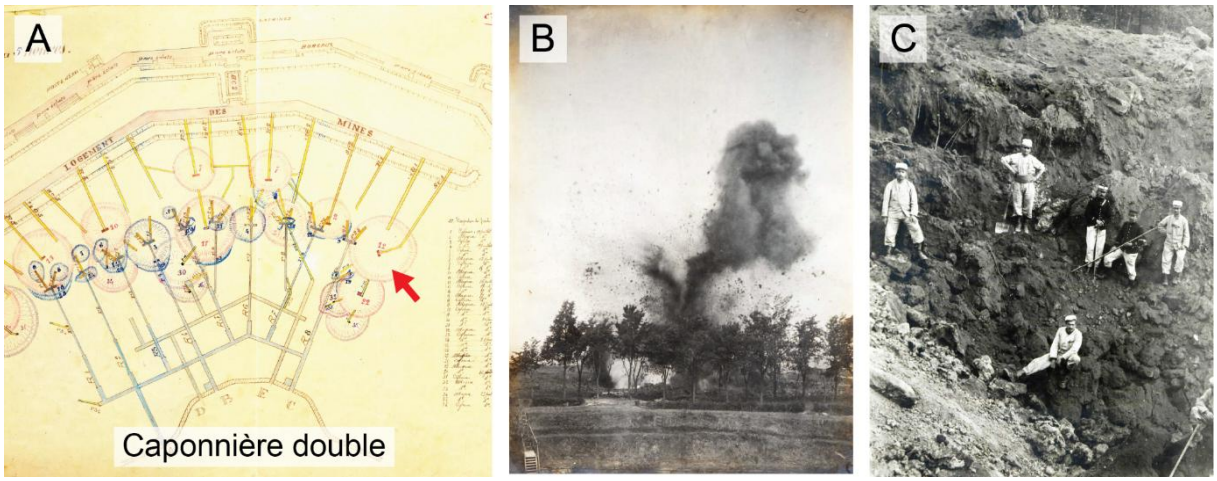


Figure 6.49 : Exercices de mines à double action des forts de Witry-lès-Reims (1912) et Brimont (1913) ayant créé de multiples cratères aujourd'hui comblés (SHD, GR 2 V 120). A : Plan d'avancement du 23 juillet 1912 à 5 h montrant l'extension des cratères de mine (flèche rouge ; fort de Witry-lès-Reims) ; B : Attaque, explosion du 7 août en avant de la caponnière double (fort de Witry-lès-Reims) ; C : Entonnoir de l'explosion n°25 du 10 août 1913 (fort de Brimont).

Conclusion de la partie 6.1

L'approche géomorphologique des morphologies Séré de Rivières permet d'appréhender les forts de type 1874 comme des reliefs anthropiques à part entière, dont la genèse, l'évolution et l'effacement sont étroitement conditionnés par la nature et l'évolution de leur fonction défensive. En articulant l'analyse morphologique issue du LiDAR à l'étude des formations matérielles (géomatériaux, massifs de terre, plantations) et aux processus associés, cette partie met en évidence une morphogenèse fondamentalement polyphasée, dominée par le fait militaire et la guerre.

La construction de la ceinture fortifiée de Reims constitue à ce titre un événement géomorphologique majeur, concentré dans le temps (1875-1885, puis 1891-1892) et dans l'espace, ayant entraîné un bouleversement topographique estimé à près de 1 700 000 m³. Par son ampleur, cet impact est comparable, voire supérieur localement, à celui induit par certains aménagements de la Première Guerre mondiale. La trajectoire morphologique des forts révèle ensuite une succession de ruptures liées à l'adaptation doctrinale, à l'intégration plus ou moins contrainte aux systèmes défensifs du conflit, puis à la désactivation de la fonction militaire, ouvrant la voie à des dynamiques d'effacement largement pilotées par des actions anthropiques civiles. À l'échelle des temps considérés, les processus naturels apparaissent ainsi comme secondaires, intervenant surtout comme facteurs d'accentuation de l'érosion de formes déjà fragilisées.

L'exemple du fort de Nogent-l'Abbesse (fig. 6.50A-E ; Ancelin et al., 2023) illustre de manière synthétique cette morphogenèse polyphasée et surimposée. Implanté sur une avant-butte coiffée de formations yprésiennes argilo-sableuses, l'ouvrage s'inscrit initialement dans un relief hérité qu'il remanie par des opérations d'arasement, de creusement et de terrassement (annexe 64). Sa construction mobilise des géomatériaux locaux, régionaux et extrarégionaux, générant l'ouverture ou l'agrandissement de carrières qui marquent durablement le paysage (fig. 6.50A). Les modernisations postérieures à la crise de l'obus-torpille se traduisent par la création de magasins à poudre souterrains externes (magasins-cavernes) et par des volumes de déblais redistribués sur les versants (fig. 6.50B). La Première Guerre mondiale introduit une nouvelle rupture morphologique, avec la destruction partielle de l'ouvrage, son intégration au réseau défensif allemand par des boyaux, des galeries et un tunnel de liaison, ainsi qu'une bombturbation intense matérialisée par des entonnoirs d'obus (fig. 6.50C-D). Les aménagements de l'entre-deux-guerres et les destructions de 1944 produisent à leur tour des formes spécifiques (fig. 6.50E), tandis que les occupations militaires tardives puis les usages civils induisent des remaniements plus ponctuels, partiellement réversibles (*cf.* partie 6.1.3.1).

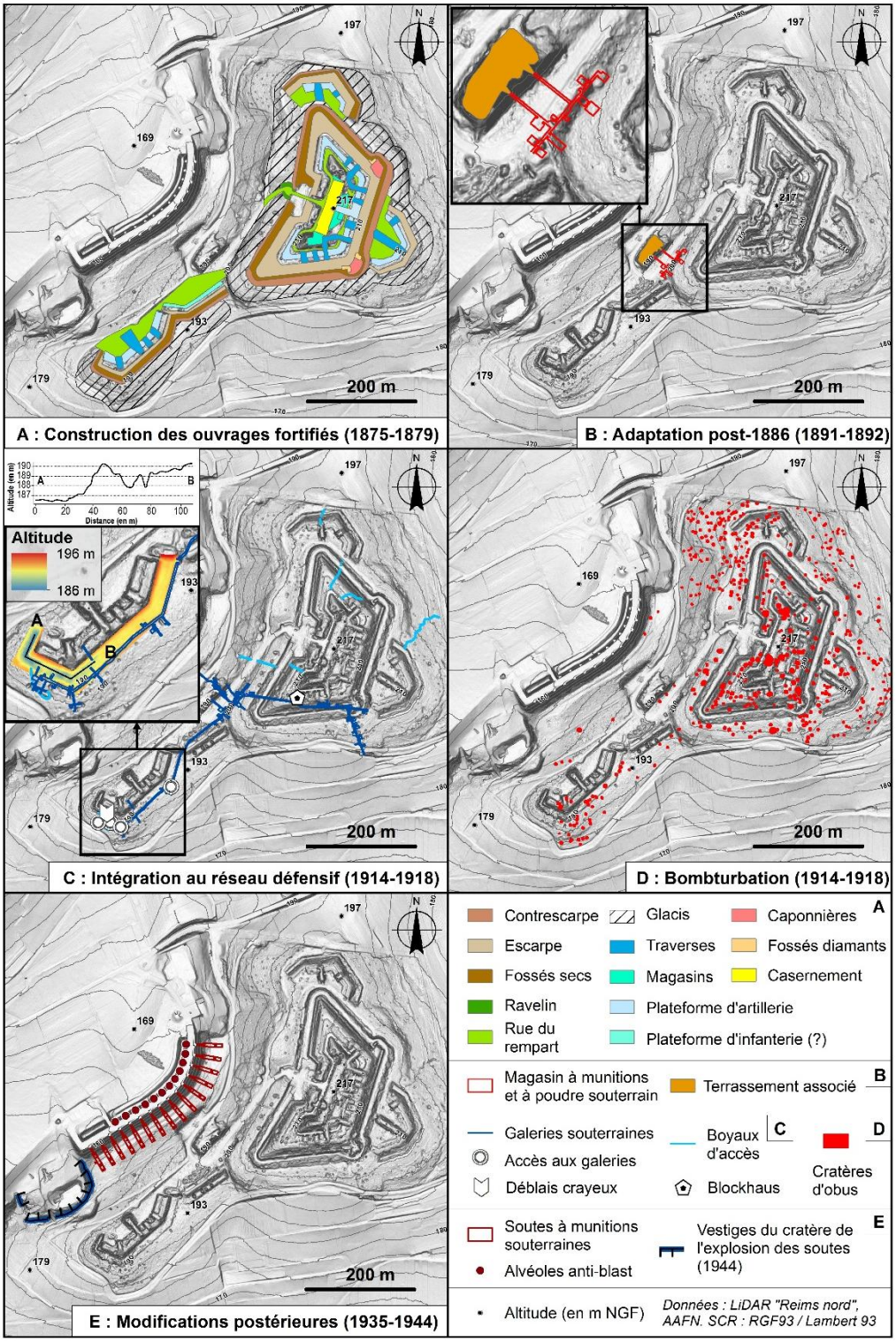


Figure 6.50 : Phases polémologiques morphogènes révélées au LiDAR ayant abouti à la polémotopographie actuelle du fort de Nogent-l'Abbesse. A : construction du fort de Nogent-l'Abbesse (1875-1879) ; B : adaptation postérieure à la crise de l'obus-torpille (1892) ; C : intégration au réseau défensif allemand (1914-1918) ; D : bombturbation (1914-1918) ; E : modifications militaires postérieures (1935-1944).

Si cet exemple est dominé par des bouleversements d'origine militaire, il permet néanmoins d'illustrer la complexité polyphasée et la surimposition des formes qui caractérisent les polémoformes Séré de Rivières à l'échelle de la ceinture. Les bouleversements induits par la fortification ne se limitent d'ailleurs pas aux ouvrages *stricto sensu*, mais incluent des polémoformes indirectes liées à la logistique de construction et à l'extraction des géomatériaux, dont la persistance dans le relief demeure inégale. L'ensemble de ces transformations fonde, aujourd'hui, des héritages environnementaux et cindyniques contrastés, directement dépendants de l'état de conservation et de la lisibilité des reliefs fortifiés.

En ce sens, les forts Séré de Rivières apparaissent comme des objets géographiques hybrides, à la fois hérités, fonctionnels et opératoires, dont l'analyse morphologique éclaire autant les dynamiques passées que les enjeux contemporains. Cette lecture morphogénétique constitue ainsi un socle nécessaire pour une mise en perspective critique des résultats, appelant une relativisation à d'autres contextes fortifiés, ainsi qu'à d'autres trajectoires, afin d'en évaluer la portée et les spécificités, mais également les limites.

6.2. La ceinture de Reims dans le système Séré de Rivières

À l'issue de l'analyse morphogénétique des fortifications Séré de Rivières, cette partie vise à apprécier la portée et les limites des résultats obtenus à partir du secteur rémois, en les replaçant dans un cadre comparatif plus large. L'objectif n'est pas de dresser un panorama exhaustif des places Séré de Rivières, mais de replacer les résultats issus du secteur rémois dans un cadre comparatif utile à leur interprétation. L'enjeu est de distinguer ce qui relève d'invariants doctrinaux du fort de type 1874, ce qui dépend des contraintes géomorphologiques du site d'implantation, et ce qui découle des trajectoires postérieures (modernisation, guerre, réaffectations). Il s'agit ainsi d'évaluer jusqu'où les signatures morphologiques identifiées à Reims peuvent être mobilisées comme références pour d'autres contextes.

La discussion s'organise en quatre sections. La première replace les forts de Reims dans le cadre morphologique et doctrinal du système Séré de Rivières, afin d'interroger leur représentativité (6.2.1). La deuxième examine le rôle du contexte géomorphologique dans l'expression des morphologies fortifiées et discute la portée des contraintes observées à Reims, au regard d'autres configurations de relief (6.2.2). La troisième analyse les trajectoires paysagères différenciées des ouvrages et leurs conséquences morphologiques et environnementales à moyen et long terme (6.2.3).

6.2.1. Les forts de Reims dans le système Séré de Rivières

Cette section interroge l'adéquation des forts de la ceinture de Reims avec les caractéristiques morphologiques et organisationnelles du fort de type 1874, qui constitue le module de base du dispositif défensif français dans la première décennie du système Séré de Rivières (*cf.* parties 2.4.1 et 2.4.2). Il s'agit d'évaluer dans quelle mesure les formes observées à Reims relèvent d'un modèle standardisé et comparable à celui d'autres places, avant d'en discuter les spécificités locales.

Le système Séré de Rivières repose en effet sur une forte standardisation structurelle et morphologique des ouvrages, découlant notamment de l'instruction du 9 mai 1874, lisible tant en planimétrie qu'en profil (fig. 2.18A-B). Les forts adoptent des tracés polygonaux à faces rectilignes, reliées par des angles simples, correspondant le plus souvent à des géométries pentagonales ou trapézoïdales au sens militaire du terme (Truttmann, 2017). Leur organisation interne s'articule autour de plusieurs ensembles fonctionnels, qui se traduisent morphologiquement par un massif de terre assurant la protection des structures, un ensemble continu associant rempart, fossé sec et glacis, ainsi qu'une succession de terre-pleins d'artillerie et de traverses, disposées soit au centre de l'ouvrage (forts à cavalier), soit en périphérie (forts à massif central ; fig. 2.16A-B). À cette période, la protection balistique

repose principalement sur des volumes de remblais profilés, les maçonneries jouant un rôle secondaire mais indispensable.

Ces principes doctrinaux produisent des morphologies robustes, dont les variations locales sont assez faibles pour permettre une comparaison pertinente entre différentes places fortifiées. Les forts de la ceinture de Reims s'inscrivent pleinement dans ce cadre morphologique standardisé. La place occupe toutefois une position particulière dans le dispositif national, étant initialement constitutive d'une ligne de résistance en profondeur adossée à la côte d'Île-de-France, située en arrière de la ligne de défense principale (rideau des Hauts-de-Meuse). Cette fonction, d'abord considérée comme innovante, est progressivement remise en question après la crise de l'obus-torpille (*cf.* partie 3.2.3.4). La ceinture n'est pas achevée (fig. 3.44) et les ouvrages, devenus rapidement obsolètes, ne font pas l'objet de programmes de modernisation ambitieux engagés ailleurs après 1886 (*cf.* partie 2.5.2).

Ce désengagement militaire, s'il conduit à une désaffection puis à un abandon progressif, a pour effet indirect de préserver les volumes initiaux des forts de première génération. L'absence de bétonnage massif et de cuirassement limite les perturbations morphologiques majeures et permet aujourd'hui, à partir des données LiDAR, une lecture particulièrement claire des volumes et formes associés au modèle de 1874 (fig. 5.13A-L).

À ce titre, Reims ne constitue pas un cas isolé au sein du système Séré de Rivières, puisque de nombreuses places ont connu des trajectoires de mise en retrait, à la marge des grands programmes de modernisation. En revanche, la combinaison de cette modernisation limitée, de trajectoires différenciées des forts pendant la Première Guerre mondiale (*cf.* partie 6.1.2) et d'une urbanisation relativement contenue (fig. 3.16C), confère à la ceinture rémoise une lisibilité morphologique particulièrement favorable à l'analyse géomorphologique, en révélant de manière efficace les processus morphogénétiques associés à ce paysage fortifié.

En définitive, ce constat constitue un préalable nécessaire à la mise en perspective des résultats et à l'examen critique de leur portée, qui sont développés dans les sections suivantes.

6.2.2. Effets du contexte géomorphologique

Cette section examine dans quelle mesure les contraintes environnementales mises en évidence sur la ceinture de Reims (*cf.* partie 6.1.1.3) peuvent être considérées comme représentatives d'autres contextes géomorphologiques. Elle s'appuie sur une mise en perspective avec différents types de configurations de relief, en particulier dans les paysages de cuesta largement développés dans le quart nord-est de la France, afin d'apprécier la portée comparative des adaptations observées.

6.2.2.1. La contrainte topographique locale comme facteur de modulation morphologique

Les forts de la ceinture de Reims prennent position sur les reliefs associés à la cuesta d'Île-de-France, qui jalonnent l'entonnoir de la percée cataclinale de la Vesle, à l'interface entre la Champagne crayeuse (Mésozoïque) et les plateaux de formations cénozoïques (fig. 3.2A-B, 3.5). Les conditions de sédimentation paléogènes et le dégagement quaternaire du relief engendrent une diversité de sites géomorphologiques allant des avant-buttes crayeuses et des buttes-témoins argilo-sableuses aux revers de côte calcaires. Leur topographie présente des géométries variables, parfois étroites ou dissymétriques (fig. 5.6A-L), susceptibles d'introduire des contraintes locales sur l'implantation des ouvrages, bien que ces contraintes puissent être partiellement compensées par les terrassements (*e.g.*, batterie de Loivre ; fig. 5.18A-D).

Ces conditions se traduisent par des ajustements morphologiques ponctuels, perceptibles dans la modulation de la forme globale des forts par rapport à leur topographie environnante. Cette adaptation peut alors conduire à des plans atypiques, parfois fortement asymétriques (fig. 6.10A-L). Le fort subtriangulaire de Saint-Thierry, dont le tracé épouse étroitement le contour de la partie sommitale de son interfluve, en constitue l'exemple le plus emblématique (fig. 6.10B).

Des situations analogues peuvent être observées ponctuellement dans d'autres secteurs du Bassin parisien lorsque les ouvrages sont implantés sur des reliefs résiduels étroits ou individualisés. La batterie de l'Éperon, qui contrôle la confluence de la Moselle et de la Meurthe, au nord de Nancy, occupe en ce sens un éperon calcaire en position dominante et présente un rempart trapézoïdal à subtriangulaire cohérent avec la géométrie de l'interfluve (fig. 6.51A-B). Cet ouvrage annexe du fort de Frouard, implanté plus en retrait sur le revers de la côte de Moselle, illustre une adaptation morphologique comparable à celle observée à Reims. Il montre par ailleurs que ces effets de contrainte peuvent rester lisibles malgré les deux phases de modernisation ultérieures effectives au sein de la batterie. Cela dans la mesure où celles-ci affectent principalement les organes internes, tandis que l'enveloppe et l'emprise topographique de l'ouvrage revêtent une forte persistance

morphologique par ailleurs observée pour les forts de Reims, même fortement effacés (fig. 5.15A-L).

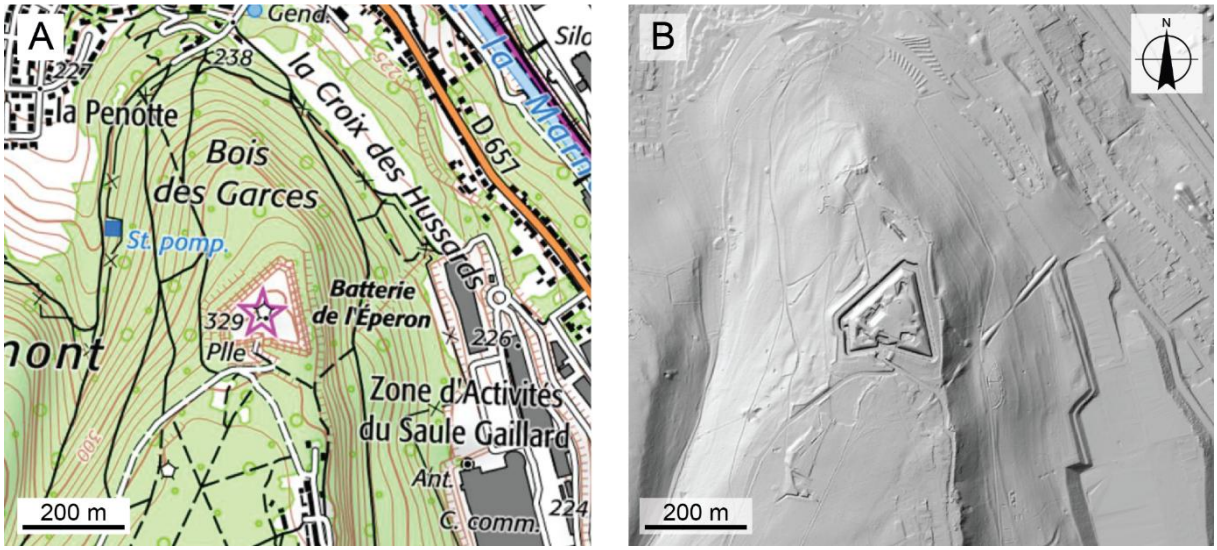


Figure 6.51 : Vue planimétrique de la batterie de Frouard (nord de Nancy). A : SCAN® 25 (IGN) ; B : MNT LIDAR HD ombré (IGN).

Toutefois, ces situations ne sauraient être généralisées à l'ensemble des paysages de cuesta. Dans de nombreux contextes, y compris au sein de percées cataclinales comparables, des replats sommitaux larges et peu contraignants peuvent constituer des surfaces disponibles avantageuses. C'est notamment le cas, plus largement, dans les cuestas de la Lorraine jurassique, où l'armature calcaire massive génère des reliefs tabulaires étendus, favorables à l'implantation d'ouvrages peu contraints planimétriquement. Le fort d'Écrouves, sur la place de Toul, illustre cette configuration par un tracé pentagonal largement indépendant des limites topographiques locales (fig. 6.52A-B).

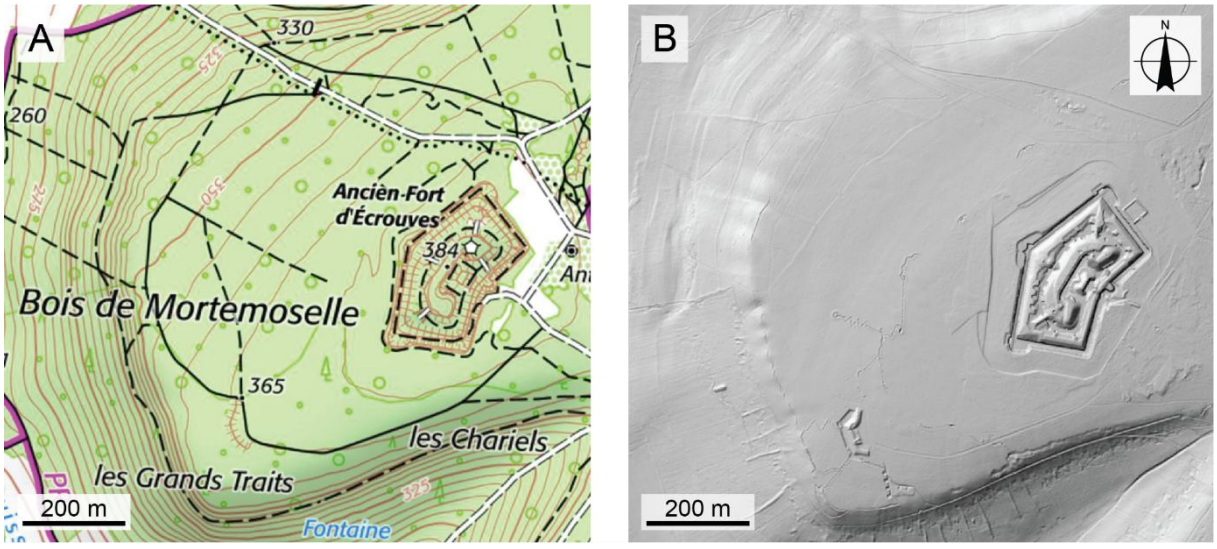


Figure 6.52 : Vue planimétrique du fort d'Écrouves positionné sur le revers calcaire de la côte de Meuse. A, C : SCAN® 25 (IGN) ; B, D : MNT LIDAR HD ombré (IGN).

Des situations similaires se rencontrent également sur certaines buttes-témoins à vaste surface sommitale, telles que le Mont-Saint-Michel (place de Toul ; (fig. 6.53A-B) ou de Ligniville (place de Langres ; fig. 6.53C-D), où les ouvrages, pentagonaux et trapézoïdaux, se déploient sans contrainte majeure. Sur les deux sites, cette topographie avantageuse est tout de même valorisée par l'intermédiaire d'enceintes-enveloppes qui ceinturent entièrement ou partiellement le bord des plateaux (fig. 6.53A-D).

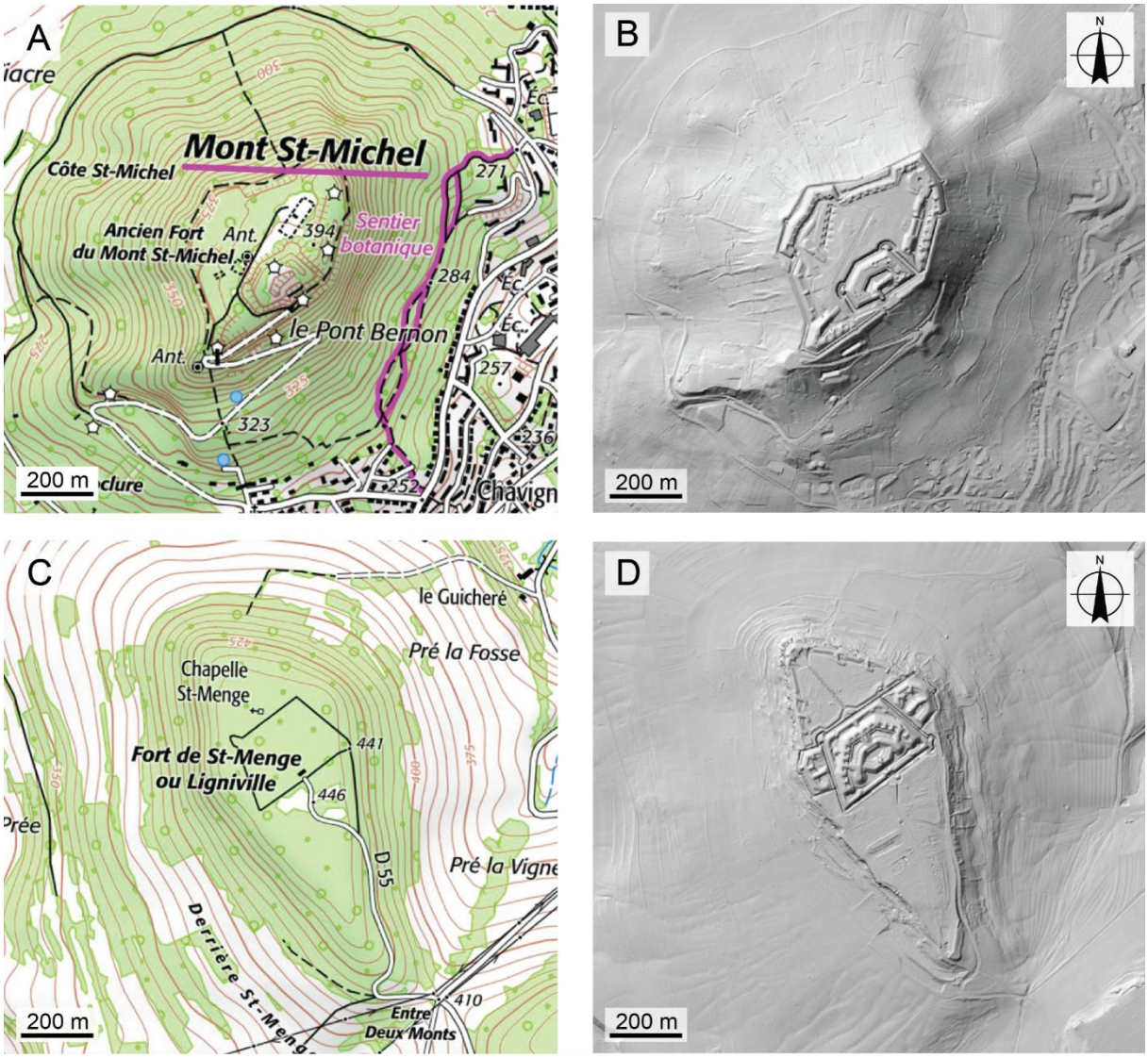


Figure 6.53 : Vue planimétrique des forts du Mont-Saint-Michel (A-B) et de Ligniville (C-D) positionnés sur des buttes-témoins calcaires jurassiques. A, C : SCAN 25® (IGN) ; B, D : MNT LIDAR HD ombré (IGN).

Dans un registre encore plus permissif, certains contextes de plaine offrent des conditions topographiques quasiment dépourvues de contraintes topographiques. Le fort des Dunes, à Dunkerque, implanté à l'interface d'une plaine maritime sableuse et d'un cordon dunaire, illustre ce cas de figure (fig. 6.54A-B). L'absence de relief structurant et la faible amplitude altimétrique permettent le déploiement d'un plan rectangulaire et d'une organisation interne peu contraints, ainsi que la mise en évidence explicite du glacis.

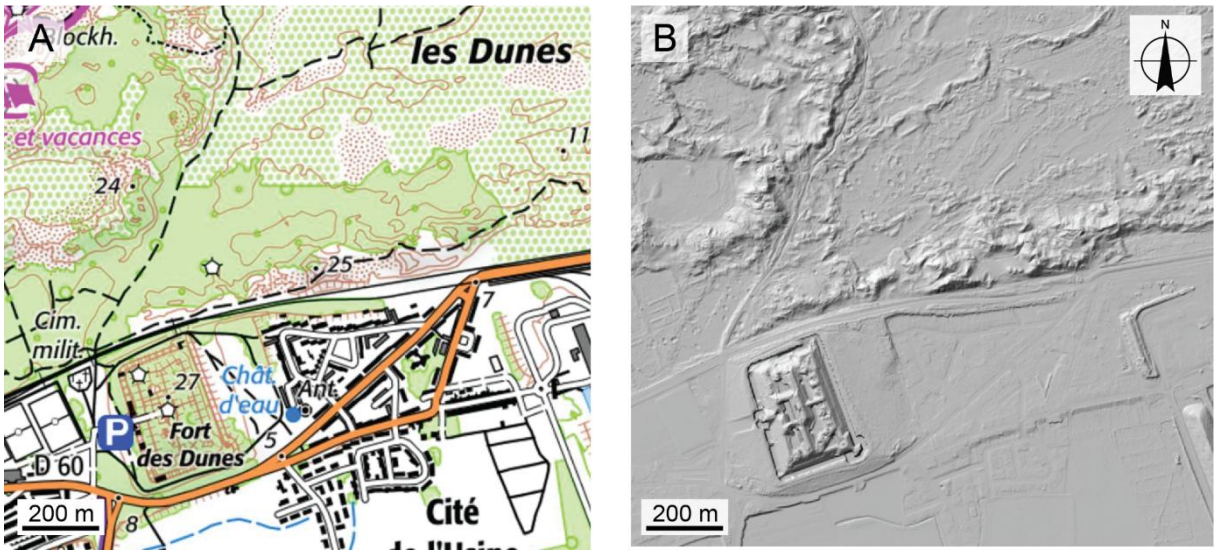


Figure 6.54 : Vue planimétrique du fort des Dunes (place de Dunkerque) positionné sur un cordon dunaire littoral. A, C : SCAN 25® (IGN) ; B, D : MNT LIDAR HD ombré (IGN).

Finalement, ces éléments soulignent que ce n'est pas tant l'appartenance à un type de relief régional, tel que la cuesta, qui conditionne directement la morphologie des forts, que la géométrie de la topographie locale du site d'implantation. Ces ajustements observés dans les cuestas de l'est du bassin de Paris ou en plaine, correspondant à des milieux peu contraignants, relèvent ainsi d'une modulation relativement faible de la forme qui ne remet pas en cause la forte standardisation morphologique et volumétrique du modèle de fortification de type 1874. D'autres reliefs, en revanche, peuvent impliquer des modifications plus conséquentes.

6.2.2.2. Contextes à contrainte morphologique structurelle et limites de la comparabilité

À l'inverse des contextes de bas-plateau et de plaine, qui offrent des conditions largement favorables à l'expression du modèle de 1874, certains contextes géomorphologiques présentent un relief beaucoup plus coercitif vis-à-vis de l'implantation et de la géométrie des ouvrages. Les possibilités de remodelage et terrassement atteignent en conséquence plus rapidement leurs limites.

Ces contraintes se rencontrent principalement dans des milieux montagnards ou sub-montagnards étroits, qui correspondent notamment aux Massifs des Alpes et des Pyrénées. La topographie, en partie caractérisée par des vallées aux versants raides, des sommets parfois très minces et des éperons rocheux individualisés, peut impliquer la création d'ouvrages aux particularismes morphologiques marqués, tant sur le plan de la forme globale que sur celui de l'organisation interne. Ces ouvrages spécifiquement conçus pour cet environnement, les *forts de montagne* (*cf.* partie 2.4.1), peuvent voir leur géométrie largement dictée par les affleurements rocheux ou les ruptures de pente, tel qu'au fort de

Béar (Port-Vendres), où aucun fossé périphérique n'entoure l'ouvrage, lequel s'intègre davantage au relief naturel (fig. 6.55).



Figure 6.55 : Vue 2,5D du fort Béar (Port-Vendres) positionné sur un promontoire schisteux en contexte montagneux et littoral (source : Google Earth).

Les secteurs de moyenne montagne peuvent également présenter des configurations particulières, parmi lesquelles ceux présentant une structure plissée et des substrats calcaires massifs et karstifiés (*e.g.*, Jura et Préalpes).

La place de Besançon constitue un des cas les plus représentatifs, placé en situation d'interface entre bas-plateau et moyenne montagne, au pied du Massif jurassien. L'hétérogénéité des sites géomorphologiques y impose des contraintes fortes engendrant des adaptations particulières, telles que des enveloppes fortifiées discontinues. Le fort de Montfaucon, implanté en bordure d'une combe développée sur l'anticlinal coffré du Doubs, au droit du faisceau jurassien de Besançon, présente une forme subtrapézoïdale asymétrique donnant par exemple l'impression d'un ouvrage partiellement tronqué, l'une de ses faces étant constituée par la paroi de la combe et dépourvue de structures de défense rapprochée (fig. 6.56A-B). De même, le fort de Châtillon-le-Duc, implanté sur un éperon calcaire particulièrement étroit dans le secteur des Avant-Monts, voit son emprise fortement contrainte par la géométrie resserrée de la croupe rocheuse dont le talus assure sa défense rapprochée à l'est (fig. 6.57A-B).

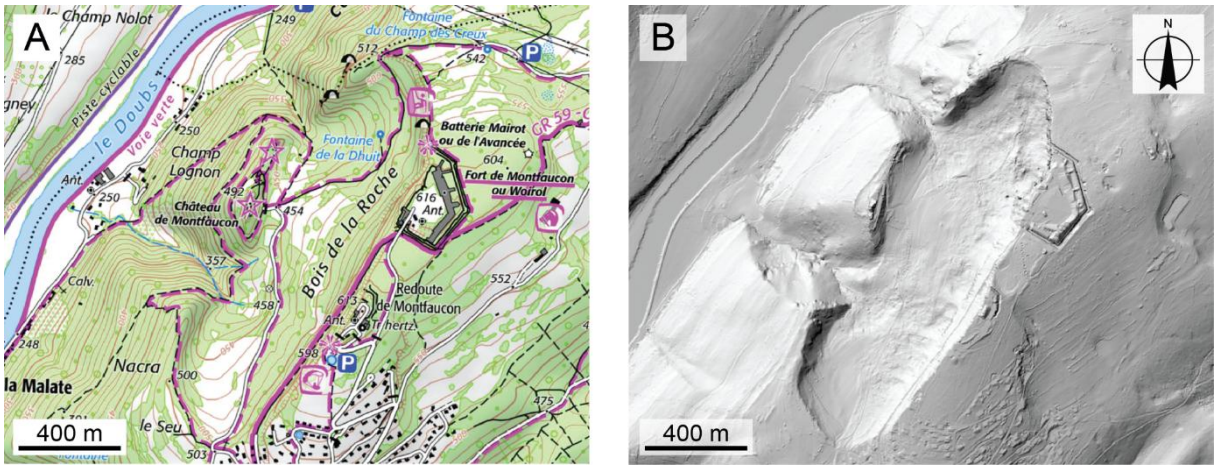


Figure 6.56 : Vue planimétrique du fort de Montfaucon (place de Besançon) positionné en bordure de combe en contexte plissé. A : SCAN 25® (IGN) ; B : MNT LIDAR HD ombré (IGN).

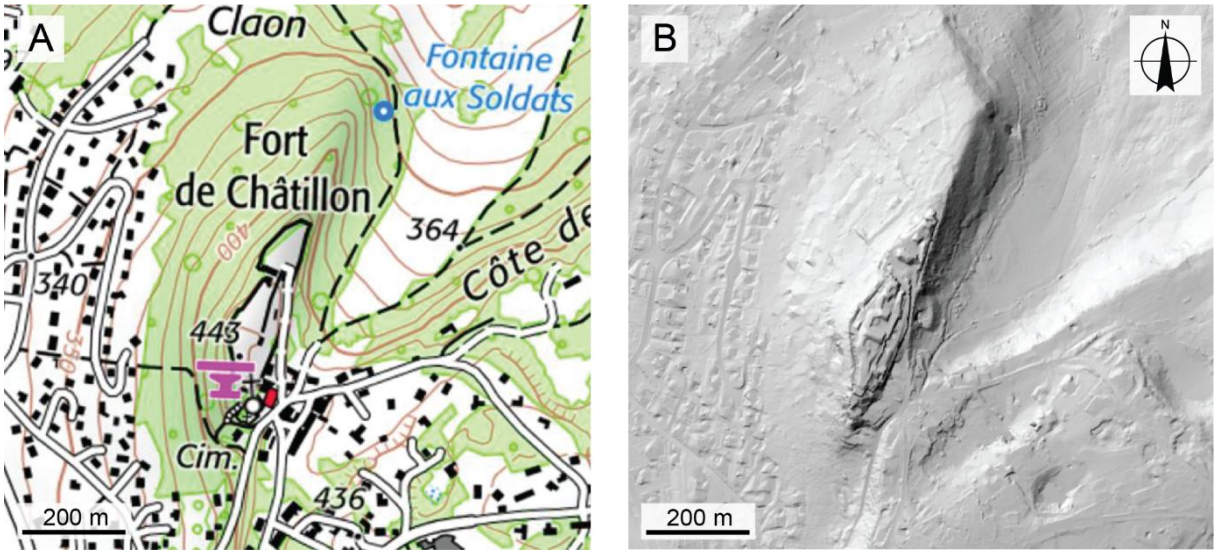


Figure 6.57 : Vue planimétrique du fort de Châtillon-le-Duc (place de Besançon) positionné sur un éperon calcaire très étroit en contexte de bas-plateau plissé. A : SCAN 25® (IGN) ; B : MNT LIDAR HD ombré (IGN).

L'existence de telles divergences morphologiques, liées à un niveau d'adaptation élevé au relief, peut rendre plus délicate l'identification des morphologies fondamentales des forts de type 1874 à partir de la seule interprétation des données LiDAR, bien que les principes structurants de la fortification, tels que la recherche du défilement, la protection balistique par des volumes massifs et la maîtrise des champs de tir, demeurent lisibles.

C'est par exemple le cas vis-à-vis de l'ensemble glacis-fossé-rempart dont la standardisation des pentes en fait normalement un indicateur pertinent d'effacement morphologique des ouvrages proches du module type (*cf.* partie 5.2.2.2.3).

Ces contextes à contrainte forte définissent ainsi une limite de comparabilité directe avec les forts de la ceinture de Reims et, plus largement, avec les configurations implantées en contexte peu ou modérément contraint, caractérisés par davantage d'invariants

morphologiques internes. Cela invite donc à une interprétation prudente des comparaisons morphométriques.

Ces cas d'étude, en contextes de plaine sableuse, de bas-plateaux sédimentaires, de piedmonts, de reliefs plissés calcaires ou de massifs granitiques montrent l'influence de la topographie, dont découle la géométrie des terrains sur lesquels sont implantés les forts, ainsi que les potentialités de défense naturelle inhérentes. De même qu'à Reims, les différences de lithologie impliquent une diversification importante des géomatériaux de construction, au gré des couches géologiques locales, qui influencent toutefois peu la forme. Ces différences s'observent clairement dans les maçonneries apparentes, dont les parements de façade des casernements qui ressortent explicitement en photographie (fig. 6.58A-D).

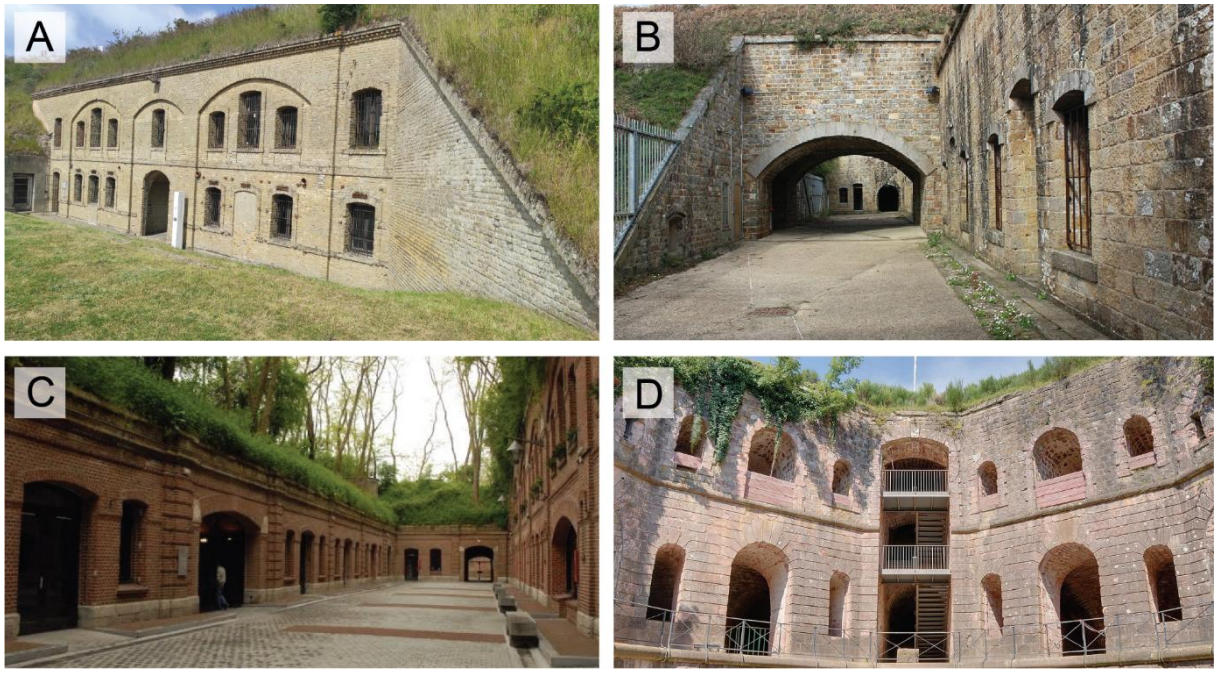


Figure 6.58 : Exemples de parement de façade de casernements de forts Séré de Rivières suggérant un répertoire lithologique diversifié à l'échelle nationale. A : Fort des Dunes en brique de sable (Dunkerque) ; B : Fort de Landaoudec en granite (ceinture de Brest, presqu'île de Crozon ; source : wiki-brest) ; C : Fort de Mons-en-Barœul en brique de terre cuite (ceinture de Lille ; cl. : Julia Montegnies) ; Fort de Giromagny en grès rose des Vosges (rideau de la Haute-Moselle ; cl. : Karl Knoll).

Elle intervient bien davantage concernant la résistance du substrat, les roches dures pouvant être directement excavées pour constituer les parois du fossé, tel que cela s'observe, de même qu'au fort de Saint-Thierry (fig. 5.41B), à la batterie de l'Éperon, où il est creusé dans les calcaires bajociens armant la côte de Moselle[25]. De surcroît, dans les régions de socle, l'absence de risque de brèche, induite par la dureté des roches cristallines, favorise, en plus de l'escarpement, l'absence de fossé. À l'inverse, les forts sur substrats plus tendres ou instables, sont susceptibles de faire face à des aléas gravitaires nécessitant une anticipation

[25] https://www.batteriedeleperon.fr/historique/

(*cf.* partie 6.1.1.3). C'est par exemple le cas à la batterie de Prémesques (place de Lille), où d'importants glissements de terrain sont documentés durant le chantier de construction, du fait d'une stratigraphie comportant une couche de glaise bleue surmontée de « *sables mouvants* » et d'une fine couche de limons (Debs et Cercy, 2020).

En conclusion, l'influence des contraintes géomorphologiques sur la morphologie des forts apparaît étroitement dépendante des contrastes de relief propres à chaque site. Dans les contextes de calcaires massifs jurassiques du Bassin parisien, les buttes-témoins et leurs surfaces tabulaires offrent des conditions d'implantation relativement peu contraignantes, permettant aux ouvrages de retrouver des morphologies proches des prescriptions doctrinales. À l'inverse, les formations tertiaires, marquées par de fortes variations latérales et verticales de faciès et de puissance liées aux conditions de dépôt paléogènes, imposent des contraintes de site plus fortes, comme l'illustre la ceinture de Reims, où la disponibilité spatiale est plus limitée et les adaptations morphologiques plus marquées. Cette configuration se traduit par une plus grande diversité des formes et par des modalités d'accès à la ressource en eau plus contrastées.

Pour autant, à l'échelle nationale, de nombreuses places fortes s'inscrivent dans des contextes morphologiques faiblement à modérément contraints (*e.g.*, Paris, Verdun, Toul, Lille, Langres, Dijon, Lyon), ce qui confère aux forts de type 1874 une relative homogénéité de leur enveloppe externe et autorise des comparaisons morphologiques pertinentes avec les ouvrages rémois. Les méthodes développées sur ce corpus, notamment l'analyse morphométrique des formes globales et l'évaluation des degrés d'effacement, apparaissent ainsi largement reproductibles, y compris dans des contextes de modernisation partielle.

En revanche, une fois l'ouvrage implanté, les trajectoires paysagères différenciées introduisent un second système de contraintes, souvent plus déterminant pour l'état morphologique actuel que la topographie initiale. Modernisations, destructions liées aux conflits, prélèvements de matériaux, réaffectations et aménagements modifient directement les volumes, la continuité des talus, la lisibilité des fossés et la rugosité du relief, et peuvent brouiller la comparabilité morphométrique entre sites. L'évaluation de la transférabilité des résultats ne peut donc se fonder uniquement sur les conditions d'implantation, mais doit intégrer pleinement ces trajectoires historiques différenciées.

6.2.3. Des trajectoires paysagères différenciées

Après avoir analysé les contraintes initiales et leurs effets sur la comparabilité des forts de type 1874, il est nécessaire d'examiner les trajectoires ultérieures afin d'appréhender complètement les différenciations morphologiques aujourd'hui observables. De même que pour la partie 6.1, relative au secteur de Reims, la focale se déplace ainsi des conditions de production des formes vers les dynamiques qui gouvernent leur transformation dans le temps, qu'il s'agisse des effets de la modernisation, de l'exposition différenciée aux faits de guerre ou des modalités de réaffectation et d'occupation des sites.

Cette section adopte la même lecture chronologique articulée à l'évolution de la fonction défensive. Elle aborde d'abord, lorsque cette dernière demeure active, les trajectoires de conception et de modernisation sélective, afin de mettre en évidence des configurations peu représentées à Reims. Elle examine ensuite les implications contrastées de la Première Guerre mondiale, entre secteurs faiblement concernés et zones de forte exposition aux destructions (fonction défensive indirecte). Elle considère enfin les trajectoires post-conflictuelles, afin d'évaluer dans quelle mesure les facteurs identifiés à l'échelle rémoise conservent leur validité dans d'autres configurations territoriales, notamment dans le cadre de la désactivation de la fonction défensive.

6.2.3.1. Des politiques de modernisation sélectives (fonction défensive active)

Cette section examine les premières inflexions morphologiques affectant les forts Séré de Rivières de type 1874 en réponse à la crise de l'obus-torpille (1885-1886). En amont de cette rupture doctrinale, il convient toutefois de rappeler que certains ouvrages de première ligne présentent déjà, dès la phase initiale, des dispositifs spécifiques absents des places de seconde ligne comme Reims.

Un nombre restreint de forts est ainsi équipé avant 1885 de cuirassements du système Mougin, destinés à protéger des positions de tir (casemates en fer laminé ou en fonte dure) ou à accueillir des tourelles cuirassées. La tourelle Mougin constitue le cas le plus lisible morphologiquement, se matérialisant en surface par une coupole d'environ 6 m de diamètre et 1,5 m de hauteur, aisément détectable au LiDAR ou, lorsqu'elle a été démontée, par une excavation subcirculaire de dimension équivalente (fig. 6.59A). Ces dispositifs introduisent, dès l'origine, une différenciation morphologique entre certains forts de première ligne et les configurations plus standardisées observées en arrière.

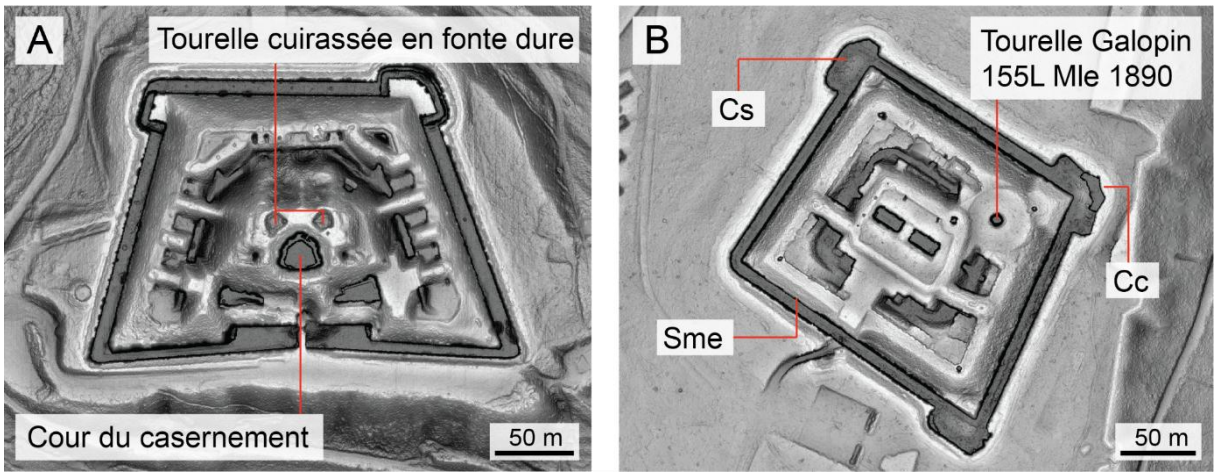


Figure 6.59 : Exemples de modernisation dans les forts du rideau de la Haute-Moselle. A : Fort de rideau de Giromagny (Territoire de Belfort) ; B : Fort de rideau d'Arches (Vosges). Cc : Coffre de contrescarpe ; Cs : Caponnière supprimée ; Sme : Suppression du mur d'escarpe.

Les programmes de modernisation engagés après 1886 accentuent cette divergence. Certaines interventions demeurent relativement peu impactantes à l'échelle morphologique (*e.g.*, coffres d'escarpe), mais la plupart engendrent des transformations structurelles plus profondes. C'est, par exemple, le cas concernant l'implantation de tourelles de nouvelle génération, la suppression des caponnières, et surtout l'arasement partiel des murs d'escarpe et l'abaissement généralisé des profils, qui altèrent l'une des composantes internes les plus standardisées du modèle initial (fig. 6.59B).

Ces modernisations se concentrent principalement sur les deux rideaux défensifs de la Haute-Meuse et de la Haute-Moselle, ainsi que dans les places alpines chargées du verrouillage de la frontière italienne (*e.g.*, Briançon, Tournoux ; Truttmann, 2017). Elles constituent, à l'échelle nationale, un premier seuil morphogénétique majeur, plus précoce que celui observé à Reims représenté par la construction de deux magasins-cavernes (fig. 5.58A-C), où la Première Guerre mondiale représente la première bifurcation morphologique d'ampleur (*cf.* partie 6.1.2).

6.2.3.2. Une majorité d'ouvrages préservée de la Grande Guerre

À l'échelle nationale, la Première Guerre mondiale constitue un second seuil morphogénétique majeur pour les fortifications Séré de Rivières, mais son impact demeure très inégal selon la position des ouvrages par rapport aux dynamiques opérationnelles. La majorité des forts, situés en retrait des axes de progression militaires ou durablement intégrés dans des secteurs stabilisés du front, subissent des transformations morphologiques limitées (fig. 6.60). À l'inverse, certains ouvrages localisés sur des zones d'offensive ou identifiés comme des objectifs tactiques font l'objet de destructions rapides et massives, générant des altérations morphologiques sur des ouvrages hors de la zone de

front, parfois supérieures à celles observées dans des contextes de guerre de position prolongée.

Cette section vise à caractériser ce contraste en distinguant les effets morphogénétiques associés aux phases offensives initiales, puis ceux liés à l'inscription durable des forts dans les systèmes de tranchées.

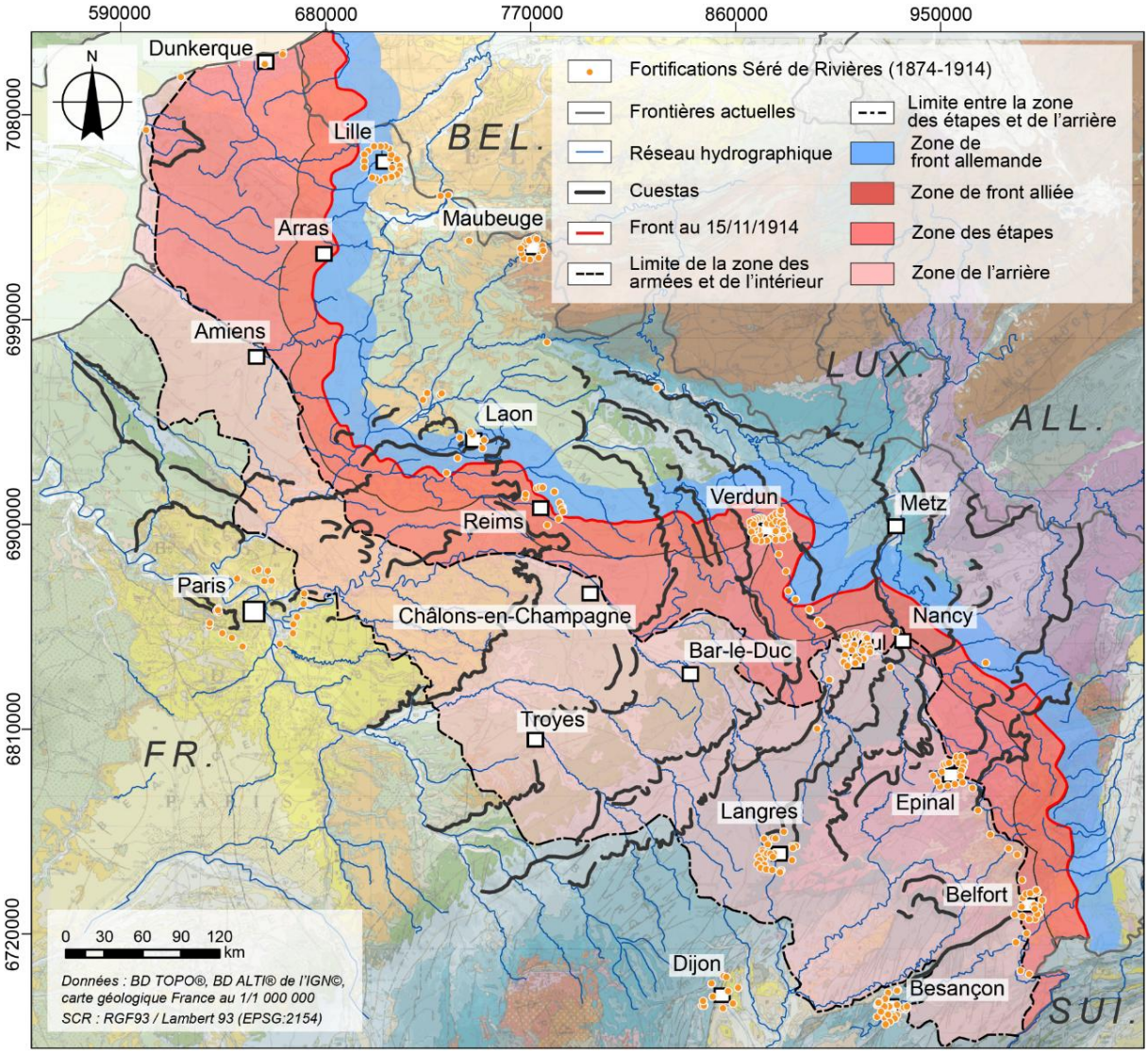


Figure 6.60 : Les ouvrages fortifiés du système Séré de Rivières au sein du front de l'ouest (d'après Taborelli, 2018).

6.2.3.2.1. Guerre de mouvement

Dans le cadre de la guerre de mouvement de l'été et de l'automne 1914, certains forts situés sur les axes de progression allemands sont soumis à des bombardements intenses, concentrés sur une temporalité courte mais d'une forte efficacité. La place de Maubeuge, qui fait face à la frontière belge, constitue un exemple emblématique (Dépret, 2016). Assiégée pendant près de quinze jours en septembre 1914, elle est attaquée alors qu'elle n'a

pas été modernisée, conséquence de l'abandon stratégique de la frontière du Nord au profit des rideaux défensifs du Nord-Est. L'inventaire des impacts d'obus réalisé par Dépret (2016), à partir de photographies aériennes d'époque, met en évidence l'emploi massif de gros calibres brisants (30,5 cm, 42 cm), ainsi qu'une surdensité de cratères concentrée au droit des ouvrages. Plusieurs obus percent directement les superstructures des forts de type 1874 dépourvus de chapes bétonnées, provoquant des ruptures de voûtes et des effondrements localisés, comme au fort de Cerfontaine (fig. 6.61A).

Le cas du fort de Manonviller, qui verrouille, entre deux massifs forestiers, la vallée de la Vezouze, illustre également cette capacité de destruction rapide (fig. 6.61B). Bombardé durant 54 heures (26-27 août 1914) par environ 17 000 obus, dont 5 868 projectiles lourds, l'ouvrage subit en outre, lors de la retraite allemande consécutive à l'offensive française de septembre, la mise à feu d'environ 60 tonnes d'explosifs positionnés au niveau des cuirassements. Cette destruction volontaire, qui semble avoir créé des cratères de près de 50 m de diamètre, brouille fortement la lecture morphologique des structures initiales et des polémoformes associées, lesquelles traduisent un terrain fortement bombturbé.

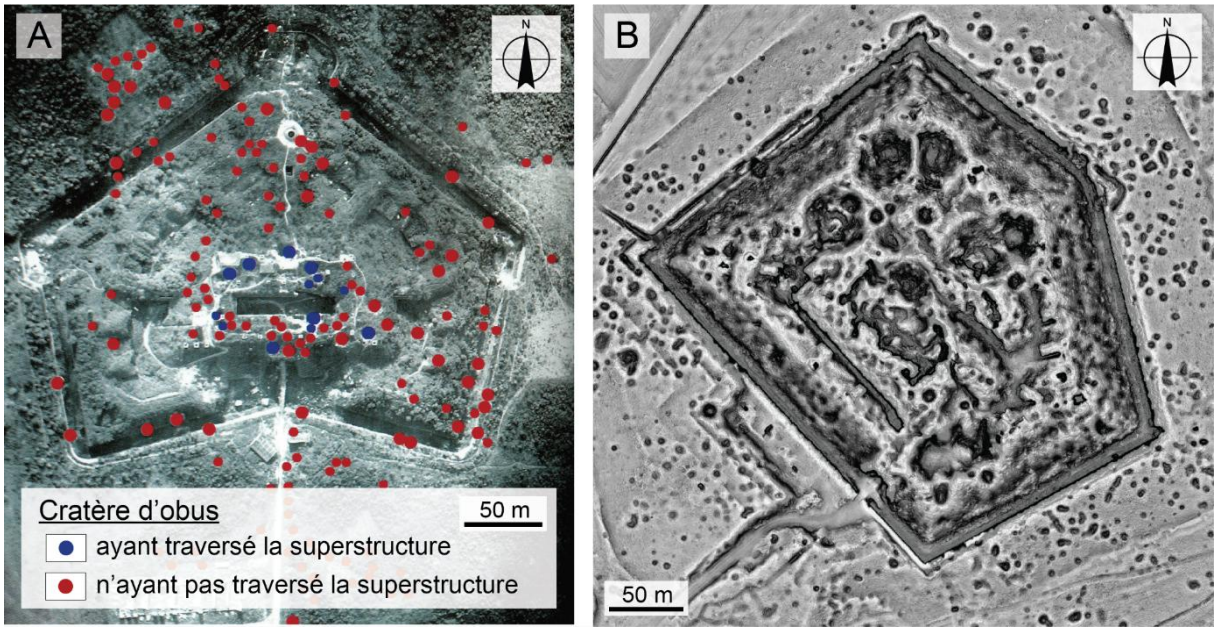


Figure 6.61 : Exemples de forts de type 1874 partiellement détruits pendant la guerre de mouvement. A : Fort de Cerfontaine (place de Maubeuge ; source : Julien Depret) ; B : MNT LIDAR HD (2024, IGN) du fort d'arrêt de Manonviller (Meurthe-et-Moselle).

Ces exemples montrent que, lors des phases offensives, l'impact morphogène peut être particulièrement élevé lorsque le fort constitue un objectif à neutraliser ou un verrou à franchir, indépendamment de la brièveté relative de son exposition aux combats. À l'inverse, lorsque les fronts se stabilisent et que les ouvrages cessent d'être des objectifs opérationnels prioritaires, leur exposition aux destructions directes peut tendre à diminuer, même lorsqu'ils sont intégrés durablement aux réseaux de tranchées.

6.2.3.2.2. Guerre de position

Lorsque le front se stabilise à l'automne 1914, la majorité des places fortifiées se retrouvent en arrière immédiat de la ligne de feu, ce qui conduit le ministère de la Guerre à autoriser de nouveau le prélèvement des ressources des ouvrages au profit des armées de campagne (Rocolle, 1973). Dans ce contexte, seuls quelques ensembles urbains voient une partie de leurs forts directement englobés dans les réseaux de tranchées (fig. 6.60) : Lille et Laon côté allemand, Verdun et Reims côté français.

Comme pour Reims (fig. 3.50), les plans directeurs de ces secteurs montrent, dans bien des cas, que les forts intégrés sont connectés aux dispositifs de défense environnants, soit directement aux tranchées principales, soit par des boyaux de liaison (6.62A-C).

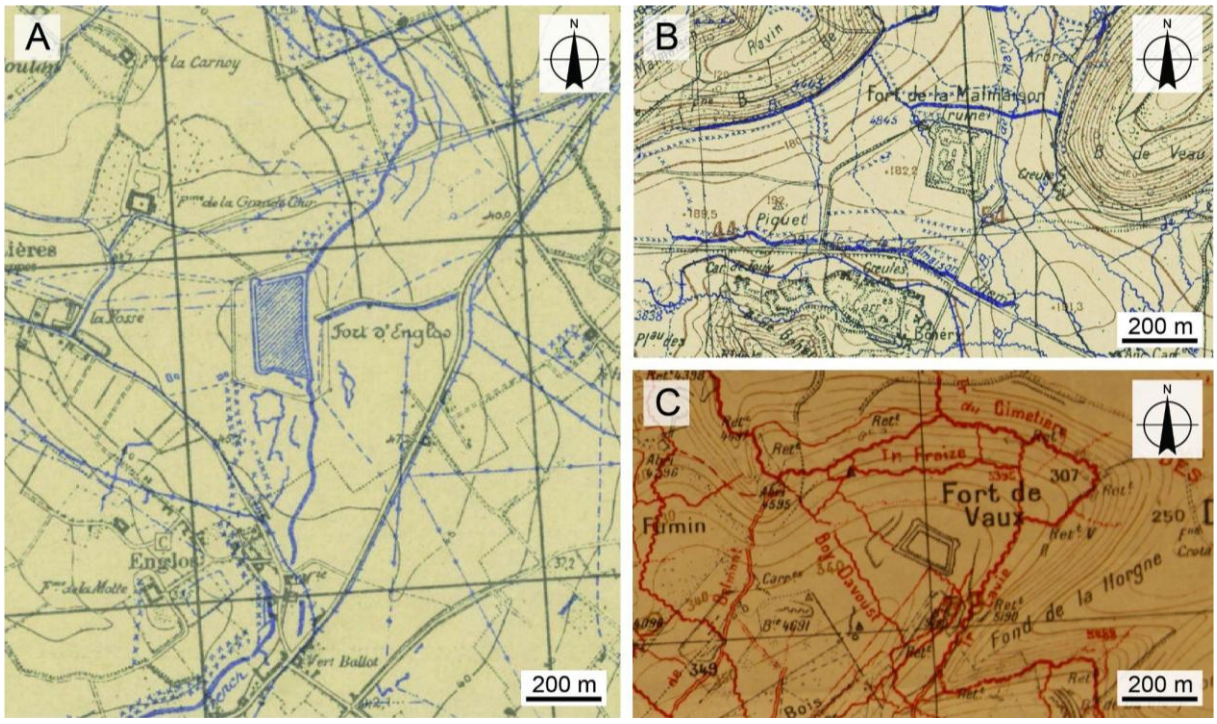


Figure 6.62 : Exemples de forts Séré de Rivières type 1874 englobés dans les réseaux de tranchées (allemands en bleu, français en rouge). A : Fort d'Englos en arrière de la première position défensive allemande (place de Lille ; plan directeur d'Armentières au 1/20 000 du 2 mai 1918 ; Harvard Map Collection) ; B : Fort de la Malmaison au sein de la première position défensive allemande (place de Laon, Chemin des Dames ; plan directeur de Vailly au 1/20 000 du 18 septembre 1918 ; Harvard Map Collection) ; C : Fort de Vaux en première position défensive française (place de Verdun ; plan directeur d'Étain A du 2 novembre 1918 ; SHD, GR 6M LVIB1C 106 - 7).

Dans les contextes de relief de cuesta, l'implantation des réseaux de tranchées demeure étroitement conditionnée par le modelé. Autour du fort de la Malmaison, les tracés suivent les rebords des cuves topographiques entaillant le mince plateau lutétien du Soissonnais, tandis qu'autour du fort de Vaux, ils épousent les rentrants structuraux des vallons anaclinaux de la côte de Meuse. À l'inverse, dans les plaines maritimes au nord-ouest de Lille, la planitude favorise des tracés plus linéaires, continus jusqu'au littoral.

L'intensité de l'impact morphologique demeure toutefois très variable. Le fort de la Malmaison constitue un cas intermédiaire documenté par l'analyse LiDAR, avec une densité élevée de cratères (67 impacts/ha) couvrant plus de 20 % de la surface totale (fig. 6.63A-C). Ces impacts résultent des expérimentations de la Malmaison de 1886 (fig. 2.25A ; *cf.* partie 2.5.1) et de la préparation d'artillerie menée par l'armée française lors de la Bataille de la Malmaison. Malgré cette bombturbation, les indices globaux de rugosité (TRI, RgI) et les distributions de pentes restent comparables à ceux de certains forts rémois faiblement bombardés (tab. 5.5), ce qui souligne les limites d'une lecture morphométrique strictement globale et plaide pour des approches multiscalaires plus fines.

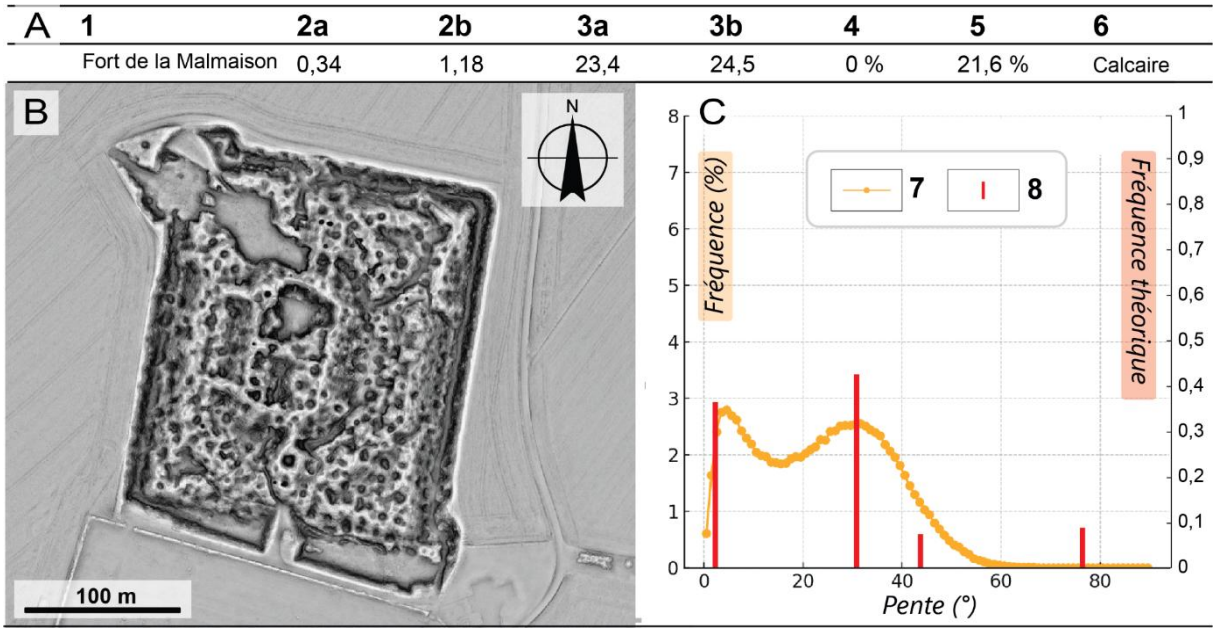


Figure 6.63 : Indices globaux de rugosité (TRI, RgI) et distributions de pentes sur le fort de la Malmaison (place de Laon, Aisne). A : Valeurs statistiques utilisées pour la détermination du taux d'effacement du fort de la Malmaison ; B : MNT LiDAR HD traité visuellement, indice de pente et LRM en transparence ; C : Diagramme de distribution des valeurs de pente du rempart et du fossé du fort de la Malmaison. 1 : Fortifications Séré de Rivières ; 2a : TRI ; 2b : RgI ; 3a : Moyenne des valeurs de pente de la zone périphérique ; 3b : Médiane des valeurs de pente de la zone périphérique ; 4 : Part du linéaire de murs du fossé encore en place ; 5 : Part de la superficie des cratères par rapport à la superficie totale ; 6 : Substrat géologique ; 7 : Fréquence ; 8 : Valeur de pente théorique d'un fort de type 1874 (fig. 4.41A-B).

Au sommet du gradient, les forts de Verdun, en particulier Douaumont et Vaux, illustrent des situations de saturation morphologique beaucoup plus élevée (fig. 6.64, 6.65). Les travaux de De Matos-Machado (2018) mettent en évidence des densités atteignant plus de 100 impacts/ha à Douaumont, faisant de ces ouvrages des archétypes de paysages revêtant des modelés « en peau d'orange » fortement bombturbés (Hupy et Schaetzl, 2006). Dans ces cas, l'enveloppe fortifiée est profondément remaniée et les volumes initiaux partiellement effacés, les structures maçonnées étant atteintes (annexe 65), et le substrat pouvant alors être localement mis à nu. Cette situation correspond au phénomène observé

à Reims, sur les photographies aériennes anciennes, pour le fort de la Pompelle et la batterie de Loivre, également placés dans la première position de tranchées (fig. 6.26, 6.27).

À l'inverse, les ouvrages situés plus en arrière des réseaux de défense, comme le fort d'Englos en troisième position défensive (fig. 6.62A), semblent avoir été faiblement affectés, bien qu'aucune donnée LiDAR publique autre que la dalle LIDAR HD de Reims n'ait été encore publiée sur ces positions pour l'attester morphologiquement. Dans ce dernier ouvrage (Dépret, 2008), et de même qu'au fort de Montbré (fig. 6.21A-D), leur emploi se traduit principalement par des aménagements ponctuels, liés à l'observation ou à la logistique, sans modification volumétrique majeure.



Figure 6.64 : Bombturbation au droit du fort de Douaumont à la fin de la bataille de Verdun le 10 octobre 1916 (source : Sylvain Ferreira).

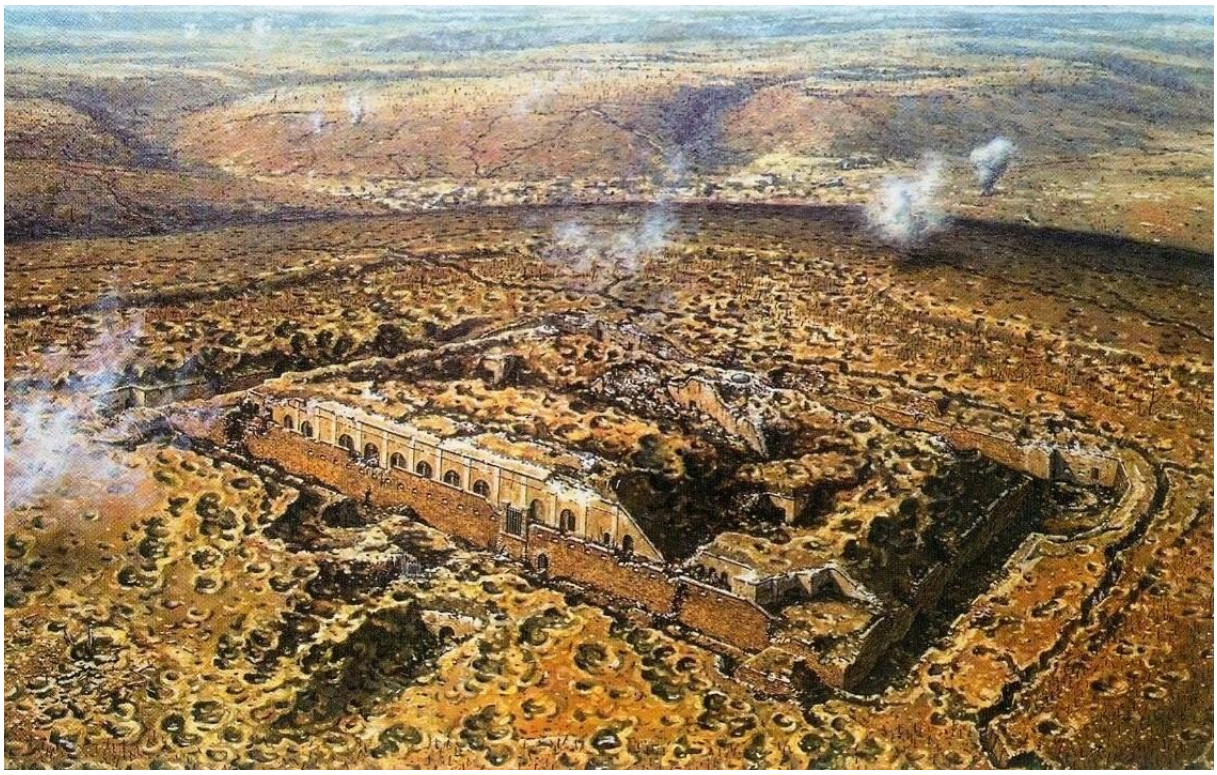


Figure 6.65 : Peinture à l'huile d'André Brauch du fort de Vaux (place de Verdun)[26].

Ces observations montrent que la guerre de position ne produit pas un impact morphologique homogène sur les forts Séré de Rivières. L'intensité des transformations dépend moins de la phase du conflit (guerre de mouvement, guerre de position) que de la position effective de l'ouvrage dans le dispositif tactique et de sa visibilité. Si certaines situations atteignent des niveaux de remaniement supérieurs à ceux observés en guerre de mouvement, la majorité des forts intégrés aux réseaux restent faiblement affectés. Après l'analyse de ce deuxième seuil morphogénétique, il devient nécessaire d'examiner les trajectoires post-conflictuelles des ouvrages afin d'évaluer dans quelle mesure les facteurs identifiés à l'échelle rémoise conservent leur validité ailleurs.

6.2.3.3. Des trajectoires différenciées

Après la Première Guerre mondiale, l'obsolescence des fortifications est définitivement actée, dans un contexte doctrinal marqué par l'enfouissement croissant des dispositifs défensifs. La fonction militaire des forts est progressivement désactivée à l'échelle nationale, selon des rythmes variables, ouvrant une nouvelle phase de leur trajectoire morphologique.

À Reims, l'analyse des trajectoires du paysage fortifié met en évidence des évolutions différenciées, étroitement conditionnées par les modalités de réaffectation des sites. Le facteur anthropique apparaît déterminant pour expliquer aussi bien les niveaux de

[26] https://verdunmonsite.wordpress.com/de-1914-a-1916/ouvrages-fortifies/fort-de-vaux/

conservation les plus élevés (forts du groupe G2) que les degrés d'effacement les plus prononcés (forts du groupe G1). Ces contrastes résultent principalement de dynamiques de réaffectation fonctionnelle et de requalification foncière mobilisant des acteurs multiples, notamment à la suite de la vente progressive des ouvrages par l'armée à partir des années 1930.

Cette section vise à confronter les facteurs d'évolution morphologique identifiés pour la ceinture de Reims à d'autres contextes territoriaux, dans le cadre des trajectoires post-conflictuelles. L'objectif est de tester une hypothèse centrale pour l'interprétation géomorphologique des forts après déclassement : lorsque la fonction défensive disparaît, la dynamique morphogénétique bascule d'un régime principalement militaire vers un régime dominé par des logiques civiles (foncier, aménagement, usages), dont les effets sur le relief peuvent être plus rapides et plus structurants que l'érosion « ordinaire ».

Il s'agit alors d'évaluer si ces logiques produisent des signatures morphologiques récurrentes, suffisamment stables pour être intégrées à une lecture comparative, et dans quelles conditions les indicateurs mobilisés dans cette thèse (organisation externe, pentes, rugosité, continuité des talus et des fossés) demeurent interprétables lorsque l'ouvrage change d'acteurs et d'usages. Deux configurations territoriales distinctes sont pour cela mises en regard de celle de Reims, dans une perspective inspirée de l'analyse d'Amat et Becker (1994), « *La ville et ses forts : du splendide isolement aux relations de voisinage* », constituant, avec les travaux de Durup de Baleine (1998), un cadre permettant d'interroger les régimes de transformation morphologique associés aux degrés d'isolement ou d'intégration des forts dans les dynamiques territoriales.

6.2.3.3.1. La ville et ses forts : un splendide isolement

Le cas de Reims s'inscrit dans un mouvement plus large de désactivation de la fonction défensive des ouvrages à l'échelle nationale, qui entraîne le retrait progressif de l'armée comme acteur morphogène de ces systèmes. À partir de l'entre-deux-guerres, puis plus nettement durant les Trente Glorieuses, un vaste processus de déclassement et de cession des forts accompagne la stabilisation de leur obsolescence doctrinale, d'autant plus consacrée par la montée en puissance de la dissuasion nucléaire. Durup de Baleine (1998) évoque plus en détail ce processus de remise au domaine et de cessions à des acteurs civils dans le Toulois, dont il présente la situation, pour ce territoire, à la fin des années 1990 (annexe 66).

Le fort de Villey-le-Sec, et son village fortifié (le seul du XIXe siècle), symbolise en quelque sorte cette dynamique car il s'agit de la première fortification Séré de Rivières gérée par une association patrimoniale à la fin des années 1960 (fig. 6.66A-B).

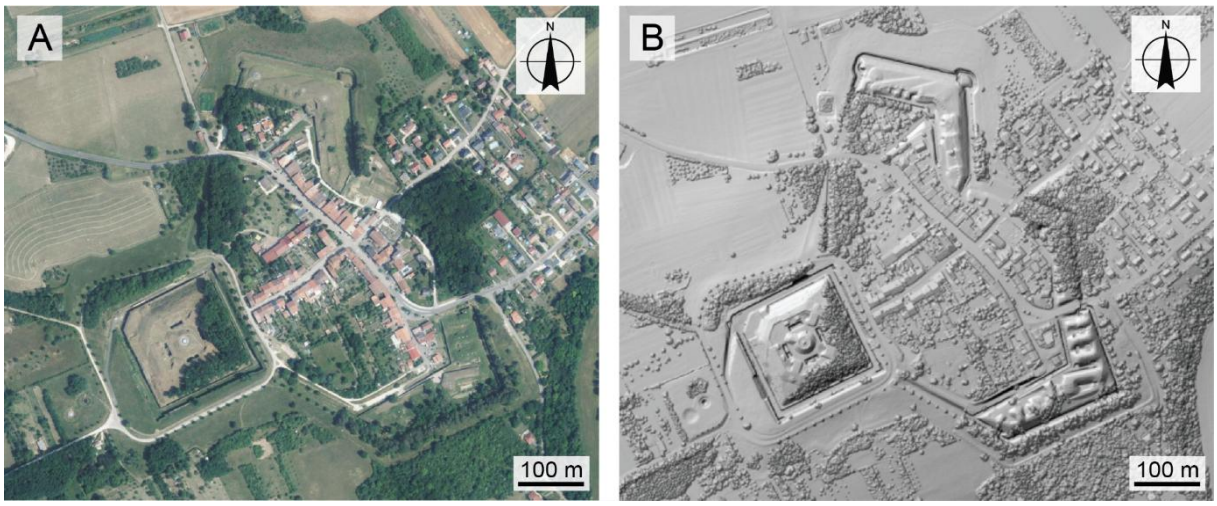


Figure 6.66 : Fort de Villey-le-Sec dont les composantes (redoute, batteries, redan) sont construites autour du village, où s'est développée la première association Séré de Rivières de France. A : Orthophotographie (BD ORTHO 2019, IGN) ; B : MNT et MNS ombrés en transparence (LIDAR HD, 2024).

Deux configurations territoriales type ressortent, avec des implications urbanistiques différentes. La première est celle des unités urbaines à petite aire d'attraction, caractérisées par une faible croissance démographique, un poids prépondérant du pôle urbain et une périurbanisation dispersée, peu régulière et relativement peu dense. Cette situation actuelle implique une faible croissance urbaine historique, ce qui fait que les forts sont encore « *fichés dans les campagnes* » et isolés des dynamiques urbaines. Cela implique de faibles enjeux pour le territoire, l'éloignement et la vétusté compliquant le développement de dynamiques de réaffectation (Durup de Baleine, 1998). De la même manière, la pression foncière à l'encontre des ouvrages est relativement faible, ce qui limite la probabilité de démantèlement.

Dans ce type de configuration, la trajectoire morphologique est dominée par une relative inertie des volumes, associée à une fermeture progressive des structures par la végétation et à des processus de dégradation lente des maçonneries et des talus (Durup de Baleine, 1998). L'effacement y relève davantage d'un émoussage diffus et d'une perte de lisibilité fonctionnelle que d'une recomposition volumétrique majeure, ce qui confère à ces sites une forte persistance morphologique malgré l'abandon des usages.

Autour de Toul (*c.* 16 000 hab.), les redoutes de Dommartin et de Chaudenay, sis sur une terrasse alluviale au centre de la boucle de la Moselle (fig. 6.67A-D), ou le fort d'Écrouves sur son revers de côte calcaire, illustrent ce phénomène (fig. 6.52A-B).

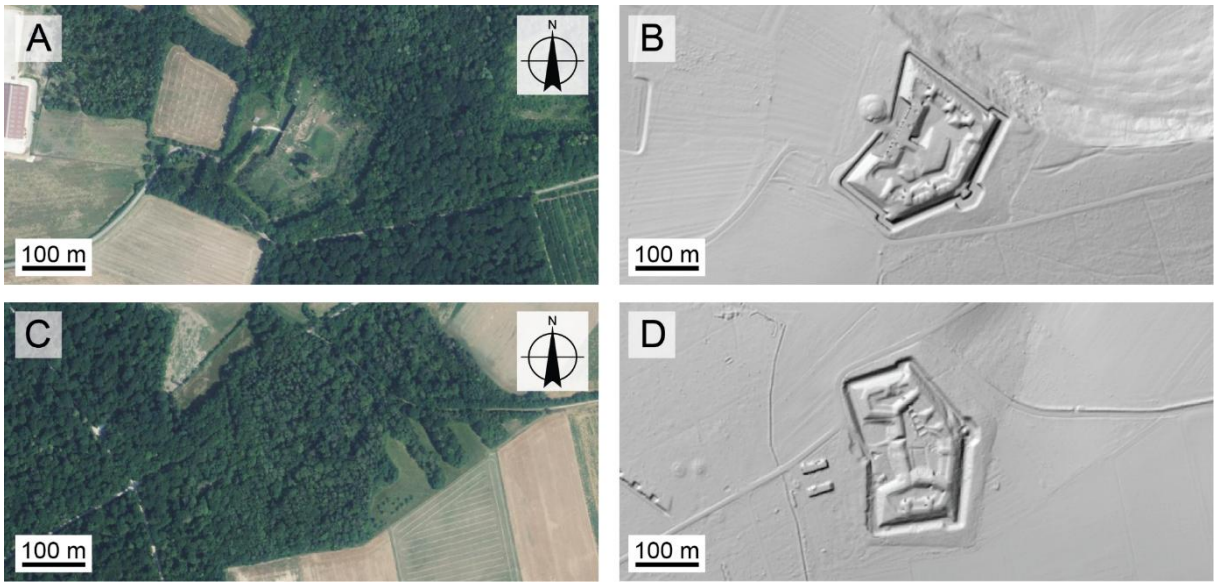


Figure 6.67 : Exemples de forts isolés au milieu d'espaces agro-forestiers sur une terrasse alluviale de la boucle de la Moselle (place de Toul ; A,C : Orthophotographies, BD ORTHO 2019 IGN ; B,D : MNT LIDAR HD IGN 2023 ombré). A-B : Redoute de Dommartin ; C-D : Redoute de Chaudeney.

En l'absence d'entretien, telle que la mise en place d'un éco-pâturage à la redoute de Dommartin (fig. 6.67A-B), les forts constituent des crypto-paysages fossilisés sous la canopée susceptible d'être progressivement oubliés par les riverains peu au fait de l'histoire locale (fig. 6.52A, 6.67C-D). Face à l'atteinte d'une forme de « *climax fonctionnel* » les processus naturels d'érosion entrent ainsi davantage à l'œuvre (infiltration, gélifraction, végétation interstitielle ; Durup de Baleine, 1998).

6.2.3.3.2. La ville et ses forts : une relation de voisinage

À l'inverse du spectre, dans les grands centres urbains denses et attractifs, la désactivation de la fonction militaire place les emprises fortifiées au cœur de dynamiques foncières et d'aménagement particulièrement actives (Amat et Becker, 1994). La proximité immédiate des tissus urbains, l'accessibilité des sites et la valeur stratégique des réserves foncières constituent des facteurs majeurs de recomposition rapide des reliefs fortifiés, souvent au détriment de leur intégrité morphologique.

Dans ces contextes, la dynamique morphogénétique est principalement contrôlée par des interventions directes sur le relief (arasements, remblaiements, terrassements, compartimentation des emprises), qui fragmentent l'enveloppe initiale et brouillent rapidement la lisibilité des structures fortifiées. L'effacement morphologique y est moins progressif que dans les situations d'isolement, mais il est souvent spatialement hétérogène, combinant des secteurs fortement remaniés et des noyaux patrimonialisés partiellement stabilisés.

Ce type de configuration, qui se retrouve par exemple à Lille[27], induit l'existence d'une croissance urbaine assez forte depuis le XIXe siècle pour atteindre l'emplacement des forts détachés (fig. 6.68A-B). Le cas de l'agglomération lilloise est parfaitement évocateur de cette ambivalence, où coexistent des trajectoires de destruction rapide et des dynamiques de conservation sélective, avec une ceinture fortifiée (1875-1885) qui se divise schématiquement en deux parties.

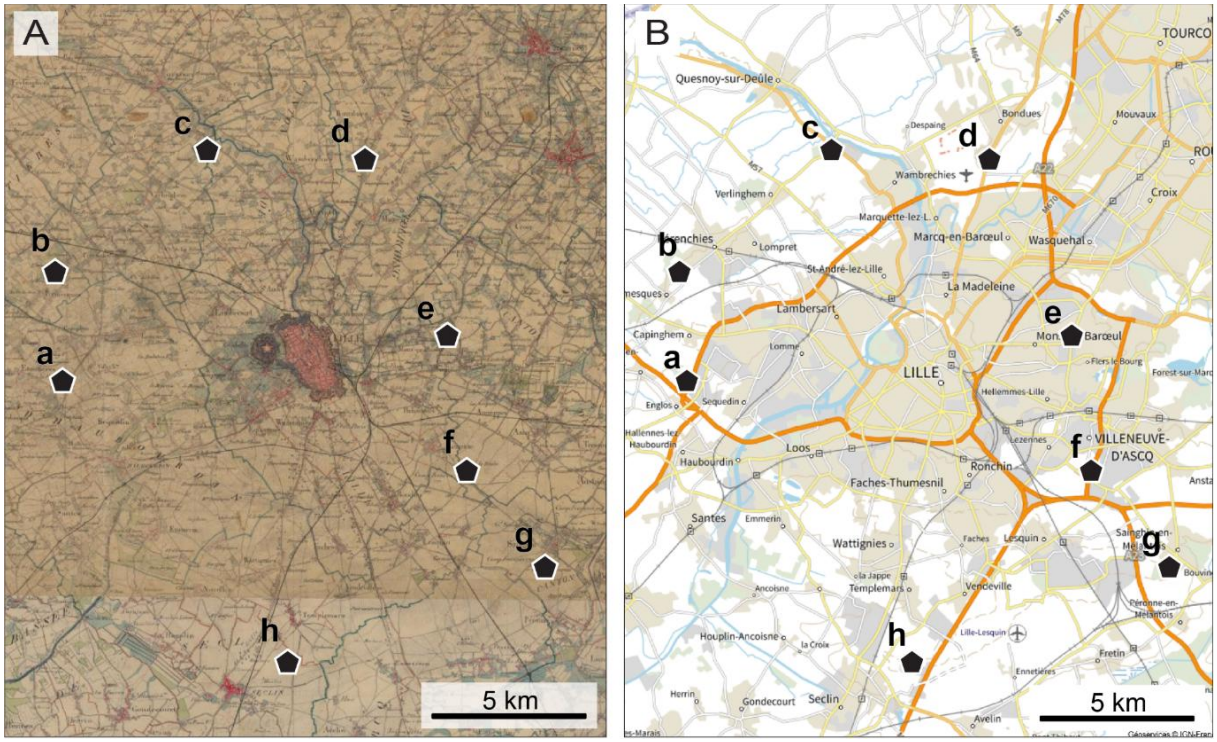


Figure 6.68 : Croissance urbaine de l'agglomération de Lille entre le milieu du XIXe siècle et les années 2020. A : Carte d'État-Major (IGN) ; B : Plan IGN (IGN). a : Fort d'Englos ; b : Batterie de Prémesques ; c : Fort du Vert Galant ; d : Fort de Bondues ; e : Fort de Mons-en-Barœul ; f : Batterie du Camp Français ; g : Fort de Sainghin ; h : Fort de Seclin.

À l'ouest de l'agglomération, plusieurs ouvrages connaissent des trajectoires de réaffectation relativement stabilisées, associant des formes de valorisation patrimoniale, associative ou communale, tout en étant progressivement intégrés à des franges périurbaines en densification (c, forts du Vert-Galant ; h, de Seclin ; a, d'Englos). Ces sites connaissent toutefois une mise sous tension progressive des emprises via une proximité croissante avec les tissus bâtis et artificialisés (fig. 6.69A-B). La batterie de Prémesques (ou de Sénarmont) constitue une exception puisque la zone fortifiée fait l'objet d'une division foncière en vue d'un lotissement pavillonnaire dès les années 1960 (b ; fig. 6.68A-B, 6.70A-B).

[27] La commune intra-muros compte 240 000 habitants pour une population totale de l'unité urbaine française de plus de 1 million d'habitants.

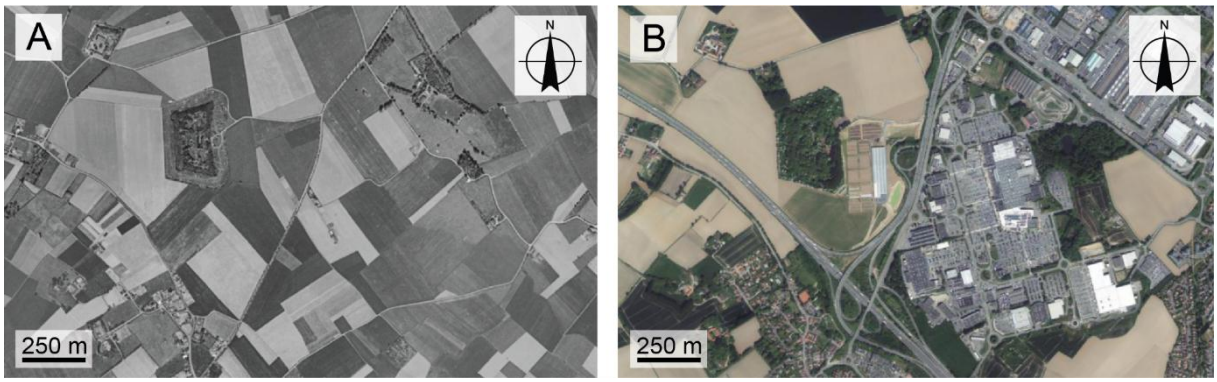


Figure 6.69 : Fort d'Englos, à l'ouest de l'agglomération de Lille, progressivement ceint par les infrastructures routières (A25, D652), commerciales et industrielles (marché d'intérêt national). A : Photographie aérienne verticale (1949 ; BD ORTHO® Historique, 2016) ; B : Orthophotographie (BD ORTHO®, 2019, IGN).

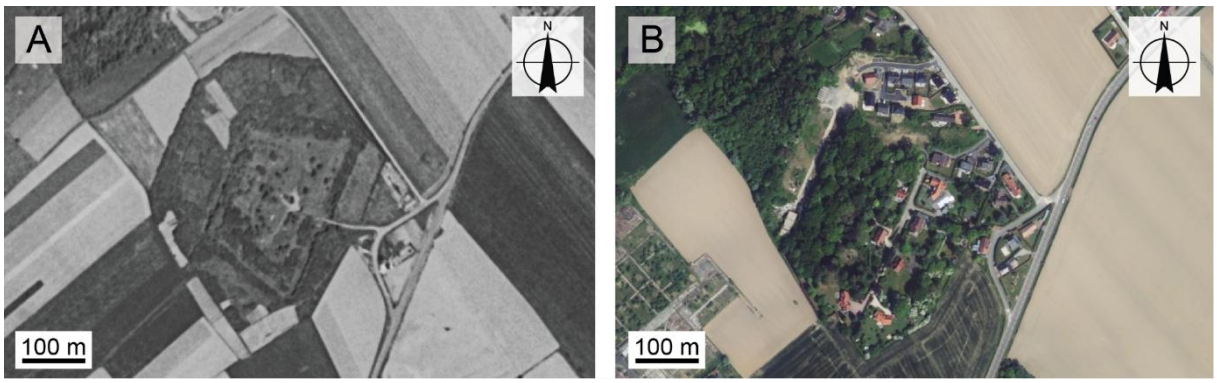


Figure 6.70 : Batterie de Prémesques (ou fort de Sénarmont) transformée en lotissement. A : Photographie aérienne verticale (1949 ; BD ORTHO® Historique, 2016) ; B : Orthophotographie (BD ORTHO®, 2019, IGN).

À l'inverse, le secteur oriental correspond à un faisceau d'urbanisation plus intensif, orienté vers Roubaix, Tourcoing et la frontière belge (conurbation de l'Eurométropole). Les emprises fortifiées y ont subi des transformations beaucoup plus radicales, allant de l'arasement quasi complet à la substitution fonctionnelle par des infrastructures, des équipements sportifs ou des plateformes commerciales, tels que pour les ouvrages de Sainghin (g), du Camp français (f) et du fort de Bondues, lequel héberge toutefois un musée de la résistance dans des structures persistantes (d ; fig. 6.68A-B, 6.71A-B).

Parmi ces démantèlements partiels ou totaux, le cas du fort de Mons-en-Barœul constitue un projet de requalification urbaine et patrimoniale d'envergure particulièrement abouti, comportant notamment la médiathèque municipale, un restaurant, ainsi qu'un parcours d'orientation sur le glacis (fig. 6.72A-B ; annexe 67). Il répond en ce sens aux propos de Amat et Becker (1994), désignant les fortifications détachées comme des « *lieu[x] riche[s] de potentialités, tant professionnelles que ludiques* », suggérant le potentiel de développement de ces structures « *supra-urbaines* » dans la banlieue parisienne, également enserrées par le tissu urbain (annexe 68).

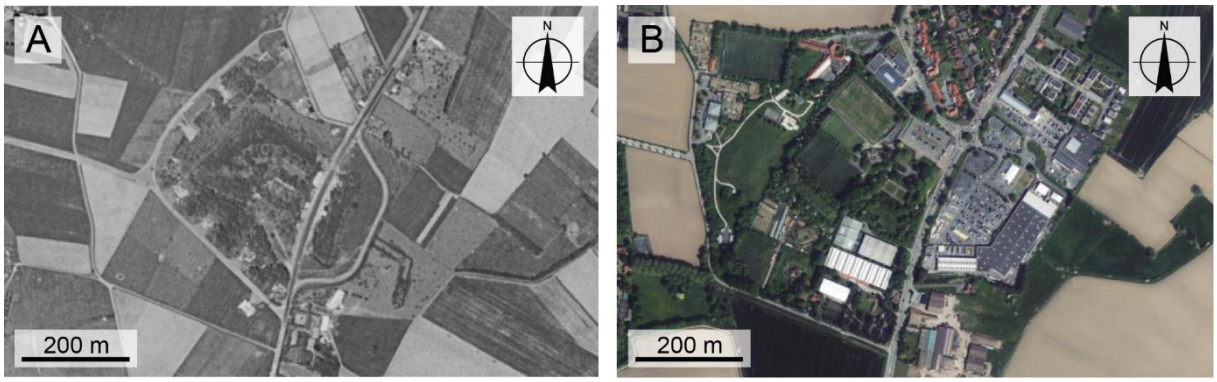


Figure 6.71 : Fort de Bondues (1879-1883) partiellement arasé pour l'implantation d'un complexe sportif et de hangars fonctionnalistes. A : Photographie aérienne verticale (1949 ; BD ORTHO® Historique, 2016) ; B : Orthophotographie (BD ORTHO®, 2019, IGN).



Figure 6.72 : Fort de Mons-en-Barœul (1878-1880) utilisé par la commune depuis 1984 dans le cadre de nombreuses activités socio-culturelles (salle d'exposition, école de musique, médiathèque, restaurant, *etc.*). A : Vue en 2,5D du fort (image Landsat, Copernicus, Google Earth) ; B : Restaurant du fort (cl : Restaurant Fort de Mons).

La ceinture de Reims semble constituer une situation intermédiaire entre l'unité urbaine de Lille, la cinquième plus grande de France, et la petite ville de Toul, avec une agglomération de plus de 200 000 habitants. Malgré une population dix fois plus nombreuse qu'à Toul, la croissance urbaine n'a pas, encore, atteint les structures, qui demeurent aujourd'hui toutes isolées. Cependant, Reims et le Pays rémois forment un pôle urbain régional intermédiaire, porté par une économie tertiaire, la filière vitivinicole, les activités agro-industrielles et une bonne accessibilité aux grands axes du Bassin parisien, générant une attractivité plus élevée que dans le Toulois. Cette situation contribue probablement à l'émergence de projets de réaffectation, comme celui du stockage de champagne au fort de Nogent-l'Abbesse par la coopérative vinicole de Nogent-l'Abbesse et Cernay-lès-Reims (fig. 6.32B-C).

Le fort de la Pompelle constitue à cet égard un cas singulier, dans la mesure où il bénéficie d'un statut de protection au titre des monuments historiques, qui ne concerne qu'environ un dixième des forts de type 1874 à l'échelle nationale (Diest, 2022 ; annexe 69). Comme aux forts de Douaumont et Vaux (fig. 6.64, 6.65), cette reconnaissance patrimoniale s'inscrit dans une construction mémorielle spécifique, liée à l'intégration précoce de certains

ouvrages dans les premières lignes de la Première Guerre mondiale et à leur forte charge symbolique dans l'imaginaire collectif.

Du point de vue morphologique, ce statut est susceptible d'agir comme un facteur de stabilisation partielle des volumes et des emprises, en limitant les risques de démantèlement et de recomposition lourde malgré une localisation dans un secteur soumis à une pression foncière et logistique élevée. La Pompelle apparaît ainsi comme un cas ambivalent, où la contrainte urbaine pourrait être en partie contrebalancée par ce régime de protection, maintenant a priori une lisibilité suffisante de l'enveloppe fortifiée pour l'analyse géomorphologique (fig. 6.73A-B).

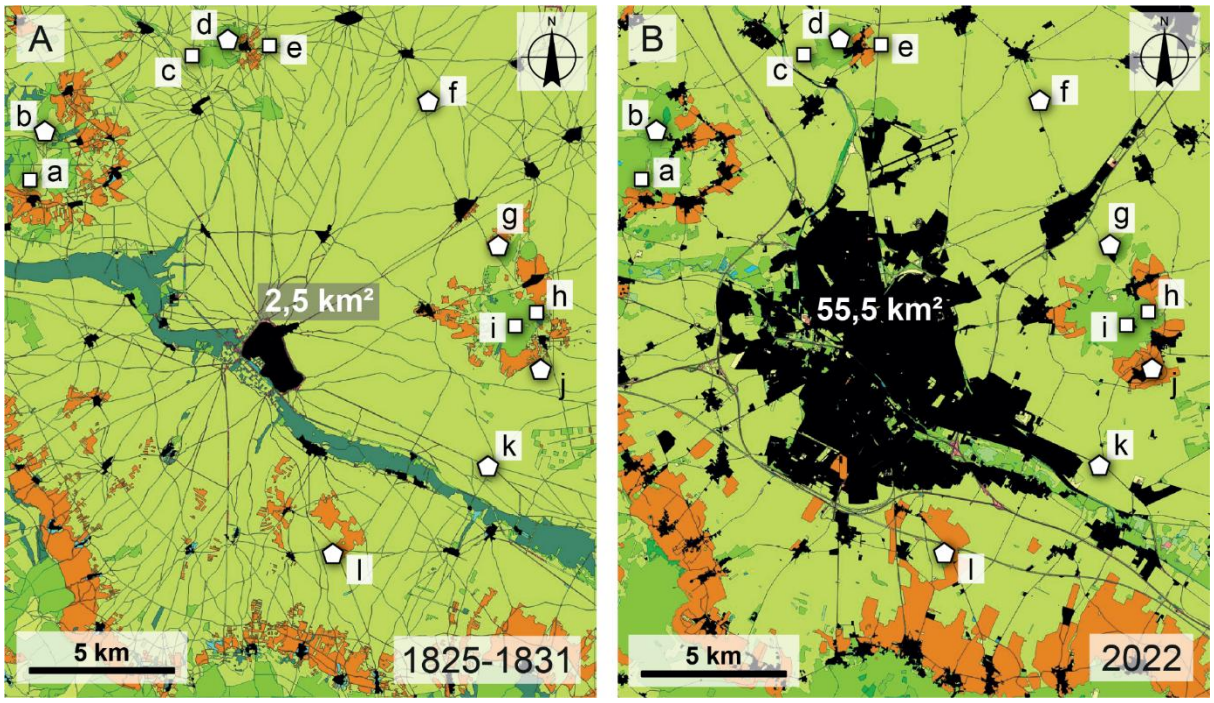


Figure 6.73 : Croissance urbaine de l'agglomération rémoise, mise en évidence avec les données d'occupation du sol. A : Occupation du sol dans les années 1830 d'après la carte d'État-Major (feuille de Reims, IGN) ; B : Occupation du sol en 2022 d'après l'OCS GE (IGN). a : Réduit de Chenay ; b : Fort de Saint-Thierry ; c : Batterie de Loivre ; d : Fort de Brimont ; e : Batterie du Cran de Brimont ; f : Fort de Fresne ; g : Fort de Witry-lès-Reims ; h : Batterie de Berru ; i : Vigie de Berru ; j : Fort de Nogent-L'Abbesse ; k : Fort de la Pompelle ; l : Fort de Montbré.

Ces configurations montrent que les trajectoires post-conflictuelles introduisent une variabilité morphologique au moins aussi déterminante que les contraintes initiales de site. Dans les contextes faiblement attractifs, l'inertie des volumes et la fermeture paysagère progressive des ouvrages favorisent une bonne conservation de l'enveloppe morphologique, compatible avec une lecture morphométrique globale. À l'inverse, dans les contextes urbains sous forte pression foncière, les transformations rapides et souvent discontinues altèrent la continuité des formes, rendant plus délicate l'interprétation des indicateurs fondés sur la géométrie initiale des talus et des fossés.

La ceinture de Reims occupe une position intermédiaire, où la relative préservation des emprises, combinée à des réaffectations ponctuelles et à une protection patrimoniale partielle, maintient une lisibilité morphologique suffisante pour l'analyse géomorphologique, tout en annonçant des tensions futures liées à l'attractivité croissante du territoire. Cette situation renforce la pertinence de Reims comme terrain de référence pour tester des méthodes d'analyse de l'effacement et de la persistance morphologique, tout en soulignant la nécessité d'interpréter ces indicateurs à la lumière des trajectoires territoriales propres à chaque place fortifiée.

Ces résultats confirment enfin que la transférabilité des approches développées dans cette thèse dépend pour beaucoup du degré de recomposition postérieure à la phase de production des reliefs et d'activité défensive, ce qui invite à intégrer plus systématiquement les trajectoires d'usage et d'aménagement dans les lectures comparatives à l'échelle nationale. À ce titre, ces quelques exemples à Toul, Lille ou Reims ne constituent qu'un échantillon de l'ensemble bien plus vaste des fortifications détachées de type 1874 construites *ex nihilo* qui parsèment les paysages français. Les travaux de Diest (2022) démontrent en ce sens la diversité des statuts et des usages, suggérant une large gamme de trajectoires morphologiques qu'il reste encore à documenter de manière systématique.

Conclusion de la partie 6.2

La mise en perspective des résultats obtenus sur la ceinture de Reims, avec d'autres contextes fortifiés, permet de préciser la portée réelle des interprétations morphologiques développées dans cette thèse. La forte standardisation doctrinale des forts de type 1874 confère aux morphologies initiales une cohérence suffisante pour autoriser des comparaisons entre les sites, notamment à partir des invariants morphologiques tels que le couple rempart-fossé, particulièrement robuste. À ce titre, le secteur rémois constitue un terrain de référence pertinent pour tester des indicateurs morphométriques et effectuer des comparaisons fondées sur les formes visibles au LiDAR.

Cette représentativité demeure toutefois conditionnée par plusieurs facteurs. Les contraintes géomorphologiques locales peuvent infléchir sensiblement la géométrie des ouvrages, tandis que les trajectoires historiques différenciées, qu'elles relèvent des modernisations, de l'intensité des destructions de guerre ou des recompositions foncières et fonctionnelles postérieures, introduisent des degrés d'effacement très contrastés. Certains écarts limitent ainsi la possibilité de transférer directement certains indicateurs.

En ce sens, l'analyse effectuée sur la ceinture de Reims constitue un référentiel permettant d'identifier des régularités morphologiques et d'en éprouver les conditions de validité. L'intérêt principal de cette démarche réside dans la possibilité de relier directement les formes observées grâce aux données LiDAR, les conditions dans lesquelles elles sont créées et leurs transformations ultérieures, afin d'interpréter de manière plus robuste les états de conservation et d'effacement des forts à l'échelle des systèmes fortifiés.

Conclusion du chapitre 6

Ce chapitre a permis d'inscrire l'analyse des formes Séré de Rivières dans une lecture dynamique des paysages fortifiés, en articulant morphologie, morphogenèse et trajectoires d'usage. L'approche géomorphologique développée en 6.1 a montré que les forts de Reims constituent des reliefs anthropiques à part entière, dont la genèse et l'évolution relèvent d'une morphogenèse polyphasée dominée par le fait militaire, puis par les recompositions civiles postérieures. La mise en perspective proposée en 6.2 a permis d'en préciser la portée nationale, en montrant que la lisibilité et la comparabilité des formes dépendent étroitement des contextes géomorphologiques et des trajectoires territoriales.

Ces résultats confirment que les morphologies Séré de Rivières ne peuvent être appréhendées comme de simples vestiges figés. Elles constituent des objets géographiques actifs, inscrits dans des dynamiques de transformation qui conditionnent leurs héritages contemporains. L'intérêt est également souligné concernant la réalisation d'une lecture intégrée, croisant données LiDAR, archives, terrain et approches environnementales, pour dépasser une lecture strictement morphométrique des formes.

Dans cette perspective, l'analyse des forts Séré de Rivières contribue plus largement à caractériser le forçage anthropique et plus particulièrement son empreinte morphologique sur les paysages de l'Anthropocène, tant du point de vue des processus que des héritages écologiques, patrimoniaux et cindyniques. Elle ouvre ainsi un champ de réflexion sur les modalités de reconnaissance, de gestion et de valorisation de ces formes hybrides, à l'interface entre géohistoire, géomorphologie et dynamiques territoriales contemporaines.

CONCLUSION GÉNÉRALE



Sortie au fort de Nogent-l'Abbesse lors des Journées des Jeunes Géomorphologues (juin 2024)

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le projet SECREI a conduit, 150 ans après leur construction, à considérer les fortifications Séré de Rivières, et en particulier les forts de type 1874, comme des reliefs anthropiques à part entière. L'enjeu n'a pas été d'appliquer un vocabulaire géomorphologique à un objet historique, mais d'évaluer ce que change concrètement une lecture géomorphologique pour comprendre les formes visibles aujourd'hui, leur morphogenèse et, par extension, leurs trajectoires d'évolution, les héritages associés et les enjeux contemporains qui en découlent.

À partir de l'étude de la ceinture fortifiée de Reims, cette thèse démontre que ces ouvrages constituent des formes anthropiques relevant d'échelles spatiales étendues, mobilisant des dimensions planimétriques hectométriques et des superficies de plusieurs hectares, correspondant par exemple au « mésorelief » selon Blume (1991) ou au « 5e ordre » des formes selon Lacoste (2003 ; Harmand et Ollive, 2015). Leur construction représente un événement géomorphologique majeur, concentré dans le temps mais durable dans l'espace, dont les effets ont été remaniés par des phases successives de transformations, principalement d'origine anthropique, depuis les modernisations techniques de la fin du XIXe siècle jusqu'aux recompositions civiles contemporaines. Les morphologies actuelles révélées par le LiDAR résultent ainsi d'une succession d'interventions militaires et civiles, auxquelles les processus naturels n'apportent qu'une contribution secondaire à cette échelle temporelle.

Ce déplacement de perspective renouvelle l'analyse à deux niveaux. D'une part, il permet d'expliciter les processus matériels qui gouvernent l'apparition et la transformation des formes : volumes et nature des géomatériaux déplacés, terrassements, bombturbation, démantèlements, nivellements, dynamiques végétales. L'état de conservation des forts apparaît, dès lors, comme le produit d'une histoire matérielle et fonctionnelle inscrite dans le relief. D'autre part, cette lecture replace les forts dans une compréhension élargie du paysage fortifié. Ceux-ci cessent d'apparaître comme de simples vestiges bâtis isolés pour être envisagés comme des objets géographiques hybrides, à la fois traces historiques, milieux écologiques, supports potentiels de patrimonialisation et structures générant contraintes ou opportunités dans l'aménagement du territoire

Le recours aux données LiDAR aéroportées a joué un rôle déterminant dans cette relecture. La vue synoptique qu'elles offrent permet d'objectiver des formes souvent invisibles au sol car masquées par la végétation et intégrées à la topographie, constituant des crypto-paysages conçus pour se fondre dans leur environnement (Durup de Baleine, 1998). Cette intégration progressive dans les dynamiques biologiques et pédologiques conduit à la formation de

milieux écologiques spécifiques, parfois à forte valeur environnementale, qui renforcent leur statut d'objets géographiques complexes.

Les résultats mettent en évidence l'ampleur géomorphologique de ces aménagements. À l'échelle de la ceinture de Reims, les forts couvrent environ 50 hectares et correspondent à un volume de matériaux remaniés estimé à près de 1 700 000 m³. Leur organisation spatiale et morphologique traduit un haut degré de standardisation issu des prescriptions doctrinales de la fortification polygonale émise par le Comité de défense. Des modèles récurrents se dégagent, tant dans la géométrie globale que dans l'organisation interne, laquelle est structurée autour d'un massif central protégé et de deux ceintures successives dédiées à l'action lointaine puis à la défense rapprochée. Cette standardisation n'exclut pas des singularités liées aux contextes géomorphologiques locaux, qui influencent la complexité interne et l'adaptation des structures.

Les forts s'inscrivent au sein d'un palimpseste topographique complexe, révélé par l'analyse LiDAR sur près de 35 km². Celui-ci associe formes naturelles et anthropiques, héritées de différentes phases d'occupation et d'usages du sol. La morphologie actuelle correspond ainsi à un état transformé, issu d'une succession d'événements morphogènes. L'analyse morphométrique met en évidence des gradients d'effacement contrastés entre ouvrages, permettant de distinguer des groupes caractérisés par des niveaux de conservation différenciés. Ces variations confirment que les états actuels résultent avant tout de trajectoires d'usage qu'il convient d'envisager dans la durée.

L'étude morphogénétique montre, en ce sens, que l'évolution des forts est étroitement liée aux transformations de leur fonction défensive. Une première phase correspond à leur construction et à leur entretien dans le cadre d'une défense active. Une seconde phase voit leur intégration, plus ou moins contrainte, aux systèmes défensifs de la Première Guerre mondiale, générant à la fois des aménagements morphogènes et des destructions importantes. Enfin, la désactivation progressive de la fonction militaire ouvre une phase longue de recompositions civiles, marquée par des requalifications foncières et/ou des réaffectations fonctionnelles.

À l'échelle nationale, la standardisation doctrinale des forts de type 1874 confère à la ceinture de Reims une valeur de référentiel. Les invariants morphologiques, notamment le couple rempart-fossé, permettent d'envisager des comparaisons avec d'autres secteurs du système Séré de Rivières. La transférabilité des méthodes d'analyse dépend toutefois des contextes géomorphologiques locaux et des trajectoires historiques différenciées, qui conditionnent la persistance ou l'effacement des formes. La ceinture de Reims constitue ainsi un laboratoire géomorphologique permettant d'identifier des régularités et de relier les

formes observées à leurs conditions de production et de transformation, tout en testant les conditions de validité des observations effectuées.

Deux prolongements principaux découlent de ces résultats, sur les plans anthropogéomorphologique et archéogéomorphologique. Le premier, à finalité environnementale et cindynique, dans la continuité du programme IMPACT 14-18 mené au GEGENA, concerne la documentation et la gestion des terrains artificiels issus des conflits. L'analyse menée sur la ceinture de Reims montre que l'exploitation des données LiDAR aéroportées permet de caractériser et de catégoriser ces terrains de manière fine, condition préalable à toute prise en compte opérationnelle dans l'aménagement et la gestion des espaces hérités des conflits et de la guerre.

De même que dans les travaux du *British Geological Survey* (Ford et al., 2010), cette recherche a permis de tester la capacité d'une approche géomorphologique à individualiser plusieurs catégories de terrains artificiels liés à la construction des forts et à leur réinscription dans les systèmes défensifs de la Première Guerre mondiale (fig. 7.1). Les formes mises en évidence relèvent aussi bien de terrains excavés, remblayés, remodelés que perturbés par des phénomènes d'effondrement ou de comblement. Leur distribution spatiale et leur organisation stratigraphique témoignent d'une artificialisation souvent totale des interfluves, où se superposent excavations, remblais, structures souterraines et formes héritées des réaffectations postérieures (Taborelli et al., 2017a).

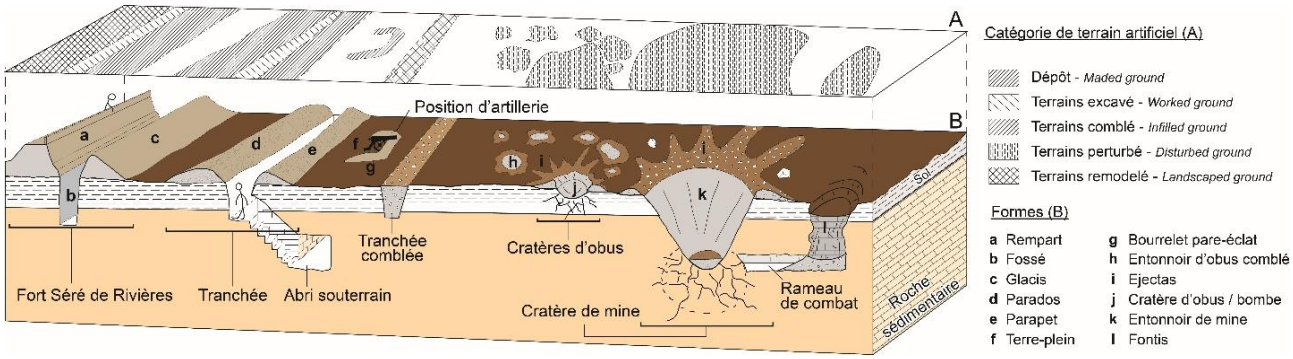


Figure 0.1 : Exemples des principaux types de terrains artificiels de guerre adaptés de la typologie de Ford et al. (2010).

La cartographie géomorphologique détaillée du fort de Saint-Thierry illustre cette complexité (fig. 7.2). Elle met en évidence un ensemble morphologique composite, où fossés excavés, glacis remblayés, massifs remodelés et anciennes zones d'extraction se combinent pour former un relief presque entièrement artificiel, localement affecté par des dynamiques d'effondrement liées aux cavités souterraines. Cette analyse permet de dépasser une approche strictement descriptive des vestiges pour envisager les forts comme des systèmes de terrains artificiels imbriqués, dont la compréhension conditionne l'évaluation des contraintes environnementales et des risques associés.

Dans cette perspective, les typologies développées par plusieurs services géologiques nationaux, notamment le *British Geological Survey* ou le *Servizio Geologico d'Italia*, constituent des références structurantes (Ford et al., 2010 ; Campobasso et al., 2021). Leur adaptation au contexte français, marqué par des spécificités historiques et militaires, ouvre des perspectives pour une meilleure reconnaissance et une gestion différenciée de ces reliefs artificiels hérités des conflits, plus largement applicable à l'ensemble des reliefs anthropiques présents sur le territoire français.

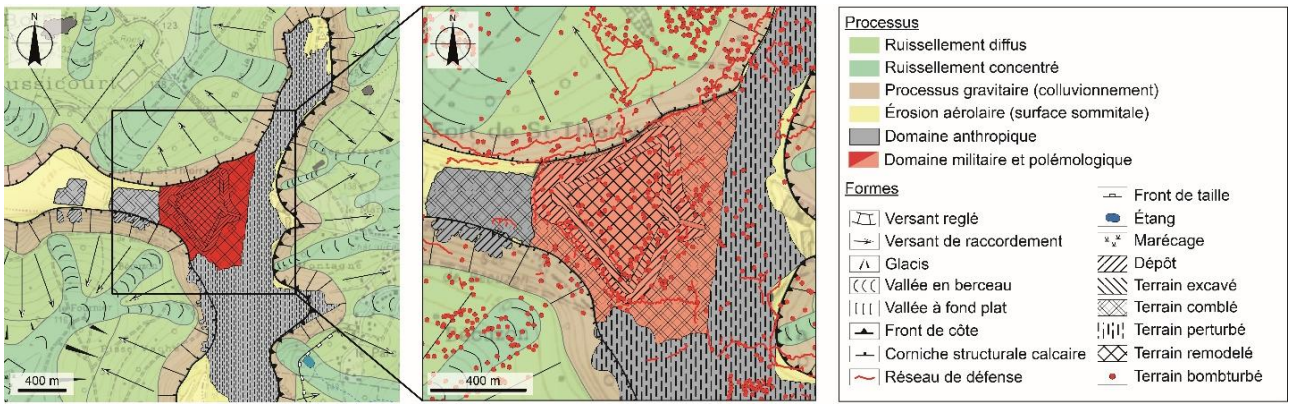


Figure 0.2 : Carte géomorphologique du secteur du fort de Saint-Thierry (1/10 000 et 1/2 500).

Le second prolongement concerne la dimension archéogéomorphologique et les questionnements géopatrimoniaux qui émergent depuis une dizaine d'années autour des reliefs anthropiques liés aux conflits (Bétard, 2017 ; De Matos-Machado, 2018 ; Scammacca et Bétard, 2026). Dans la continuité des travaux consacrés aux polémoformes de la Grande Guerre, l'analyse conduite sur le paysage des fortifications Séré de Rivières confirme la pertinence d'intégrer ces formes dans le champ des objets géomorphologiques susceptibles de faire l'objet de réflexions sur leur conservation, leur transmission et leur valorisation. L'identification de critères axiologiques, qu'ils soient scientifiques, esthétiques, culturels, écologiques ou fonctionnels, permet en effet d'envisager ces reliefs au-delà de leur seule dimension militaire, en les replaçant dans une lecture du paysage géomorphologique auquel ces différentes valeurs sont attribuées (Reynard, 2005).

Sur le plan scientifique, l'étude met en évidence l'existence d'un modelé caractéristique associé aux forts de type 1874, répondant à la triple logique fonctionnelle d'intendance, d'action lointaine et de défense rapprochée. Ces morphologies relèvent d'un même système morphogénique dominé par une séquence-type, c'est-à-dire une évolution caractérisée par la répétition, dans un ordre défini, de phénomènes qui sont identiques dans leur forme essentielle (Coque, 2002). Cette séquence s'organise autour de plusieurs phases majeures (ou crises morphogéniques), correspondant à la construction, aux modernisations techniques, à l'intégration aux réseaux de défense et aux destructions de guerre, puis aux

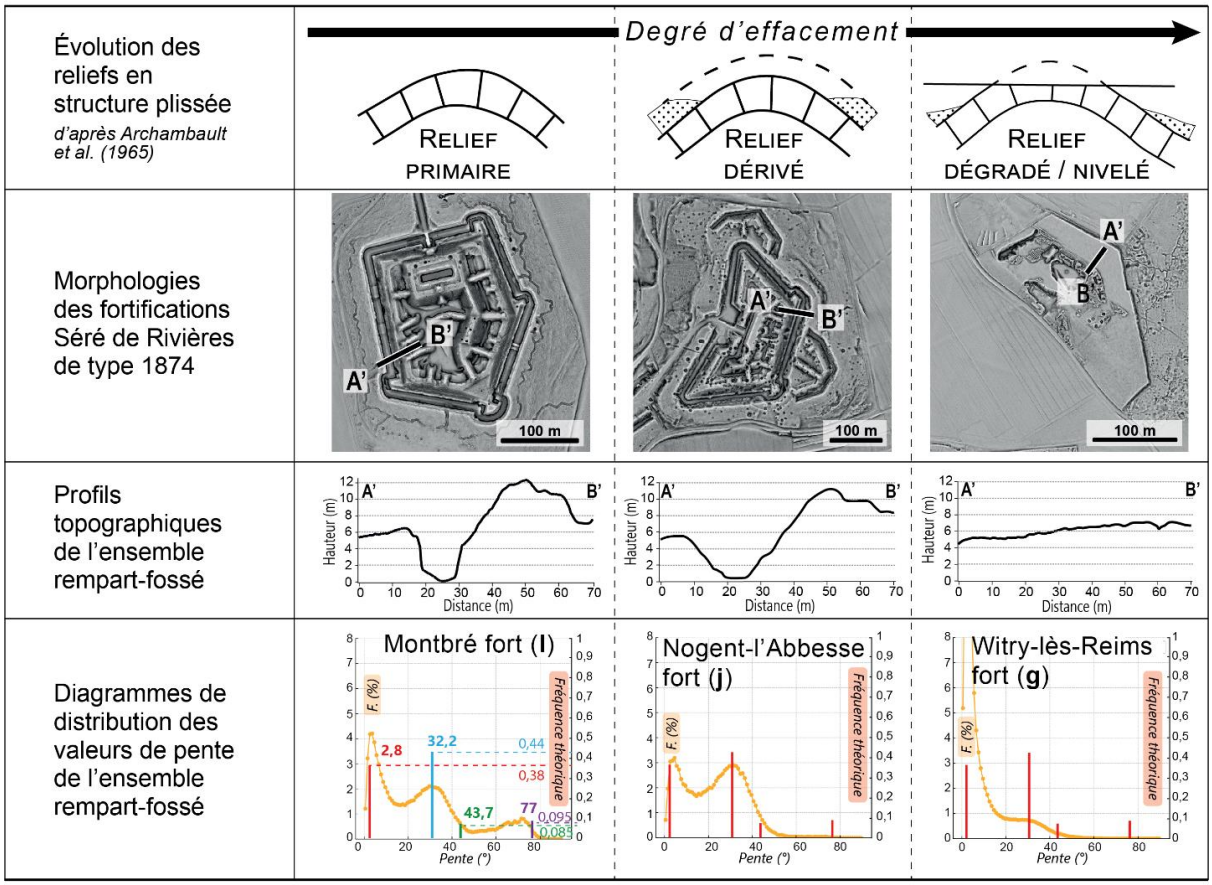
transformations postérieures à la sortie du domaine militaire, lesquelles sont séparées par des phases morphodynamiques plus équilibrées.

La mise en défense du territoire à la fin du XIXe siècle peut ainsi être envisagée comme un événement géomorphologique majeur à l'échelle historique, dont les effets morphologiques se prolongent jusqu'à aujourd'hui et se prolongeront dans le futur. L'analyse conduit à transposer aux reliefs issus des conflits certains paradigmes d'évolution géomorphologique habituellement réservés aux temps géologiques plus longs, en les replaçant dans une perspective morphostratigraphique propre à l'Anthropocène (échelle historique ; Ancelin et al., 2024). Les formes observées peuvent ainsi être distinguées selon différents états évolutifs, inspirés du modèle d'évolution du relief en structure plissée d'Archambault et al. (1965), avec trois états morphologiques distingués selon un gradient d'effacement croissant : relief « primitif », bien préservé et proche de l'état initial ; relief « dérivé », affecté par des processus d'érosion, de comblement ou de remaniement modérés ; relief « dégradé » ou « nivelé », fortement atténué voire presque entièrement effacé (fig. 7.3). Ces trajectoires conditionnent à la fois leur lisibilité morphologique, leur potentiel de conservation et leur capacité à porter des valeurs patrimoniales.

L'intérêt géomorphologique de ces reliefs se trouve renforcé par les valeurs complémentaires. Sur le plan architectural, la dimension sérielle des ouvrages masque une grande diversité de solutions constructives et de mises en œuvre matérielles, qui a alimenté les principales dynamiques de patrimonialisation depuis plusieurs décennies (Truttmann, 1992, 1994, 2017 ; Fouqueray, 2003). Sur le plan esthétique, l'intégration de ces structures en pierre de taille dans des cadres paysagers souvent forestiers ou ruraux confère à certains sites une qualité paysagère reconnue. Sur le plan écologique, la présence des forts favorise la diversification des habitats et le maintien de biocénoses parfois rares à l'échelle régionale, notamment en contexte forestier ou cavernicole, optimisant localement la continuité écologique. Sur le plan culturel enfin, ces ouvrages s'inscrivent dans une mémoire collective associée à l'histoire militaire et aux paysages de guerre, bien que cette mémoire privilégie encore largement les périodes de conflit au détriment de la longue trajectoire paysagère de ces structures.

Les limites de la thèse tiennent en partie au cadre disciplinaire et méthodologique mobilisé. L'analyse repose prioritairement sur la lecture morphologique des formes révélées par les données LiDAR aéroportées, ce qui implique un champ de validité centré sur les reliefs hérités observables après plus d'un siècle de transformations. Cette approche ne peut ainsi pas restituer un état originel exhaustif ni documenter directement l'ensemble des dimensions verticales. Elle souligne à l'inverse la nécessité de mobiliser des approches interdisciplinaires complémentaires pour appréhender la complexité de ces objets, qu'il s'agisse des géomatériaux, des structures enfouies ou des dynamiques écologiques associées.

A



B

Pente moyenne		1,27	1,17	1,1
TRI		26	22,7	9,3
Écartement à la FCC théorique	(P1-M1)	1,4	10	46,4
	(P2-M2)	1,5	8,3	32,2
	(P3-M4)	1,3	9	/

Figure 0.3 : Échelle d'effacement théorique des morphologies associées aux forts Séré de Rivières de type 1874 (Ancelin et al., 2024). A : Indicateurs visuels ; B : Indicateurs statistiques (TRI : *Terrain Ruggedness Index* ; FCC : Fréquence cumulée croissante). Les images LiDAR, les profils topographiques, les diagrammes de distribution et les valeurs statistiques illustrent trois situations représentatives : un état de conservation élevé (fort de Montbré), caractérisé par une lisibilité morphologique nette, des profils rempart-fossé proches des valeurs théoriques et une distribution trimodale des valeurs de pente (relief primaire) ; un état intermédiaire (fort de Nogent-l'Abbesse), marqué par des régularisations de talus, des comblements partiels et des modifications polyphasées (relief dérivé) ; un état fortement dégradé (fort de Witry-lès-Reims), où les formes originelles sont atténuées par les nivellements, les démantèlements et les usages agricoles postérieurs (relief dégradé, voire nivelé).

Les perspectives ouvertes par ce travail s'inscrivent dans un champ scientifique encore en structuration, à l'interface entre archéologie des conflits (Billard et al., 2024), géographie militaire (Boulanger, 2006, 2018), géosciences militaires (Bondesan et Ehlen, 2022), géologie (Ford et al., 2010 ; Bergerat, 2018) et géomorphologie (Hesse, 2014 ; De Matos-Machado, 2018). L'absence relative de référentiels méthodologiques stabilisés confère à ces

recherches un caractère exploratoire mais également structurant. Dans ce contexte, l'appropriation d'une lecture géomorphologique des fortifications contribue à renouveler la manière de caractériser l'empreinte anthropique sur les reliefs dans l'Anthropocène. La rugosité polémologique du relief, dans son acception englobant tout type de fortification, peut ainsi être envisagée comme un indicateur d'anthropisation, à l'image des morphologies exokarstiques témoignant du degré de karstification d'un massif (Martin, 2000) ou de la rugosité sur les versants instables en Champagne (Marre, 1987 ; Guérémy et Marre, 1991 ; Bollot et al., 2025). À l'inverse, les processus de nivellement et d'atténuation, liés notamment aux remaniements agricoles ou urbains, traduisent des dynamiques d'enfouissement ou de fossilisation des polémoformes, susceptibles d'être ponctuellement exhumées lors d'opérations d'archéologie préventive (polémoformes d'ordre taphonomique ou « endopolémoforme » ; Devos et al., 2021).

À l'échelle nationale, la poursuite de l'exploitation des données LiDAR en cours d'acquisition par l'IGN (LIDAR HD) ouvre la possibilité d'établir un état des lieux élargi des morphologies associées aux forts de type 1874 et, plus largement, au système Séré de Rivières. L'application d'un volume bouleversé moyen issu des forts de Reims (130 000 m^3) permet d'envisager une première estimation du volume bouleversé total s'élevant à plus de 30 millions de m^3. La constitution d'une base de données homogène permettrait d'affiner cette estimation, d'identifier des régularités morphologiques à petite échelle et de mieux caractériser la diversité des trajectoires paysagères (annexe 70). L'extension de cette approche à des contextes extranationaux, notamment aux fortifications contemporaines construites en Europe à la même période, offrirait également un cadre comparatif fécond pour préciser la portée des interprétations proposées (*e.g.*, *Festen* allemands actuellement situés en France ; annexe 71). L'étude des structures postérieures à 1885, caractérisées par un enfouissement accru et une simplification volumétrique liée aux nouvelles exigences de protection, constitue également un prolongement nécessaire pour appréhender l'évolution morphologique du système défensif dans son ensemble (fig. 7.4).

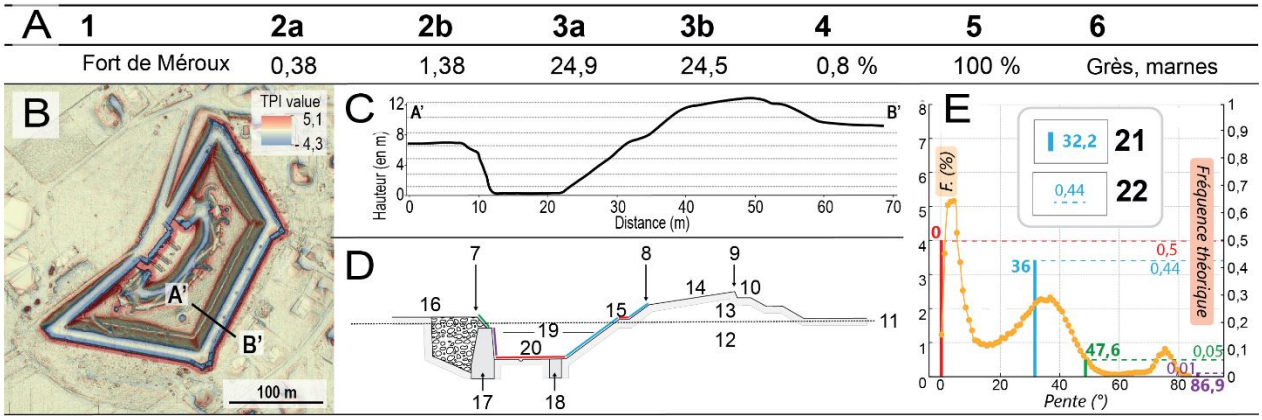


Figure 0.4 : Morphologies du rempart du fort de Méroux (en coupe et en plan ; secteur de Belfort ; 1908-1913). A : Valeurs statistiques utilisées pour la détermination du taux d'effacement du fort de Méroux (*cf.* parties 5.2.2.2.1 et 5.2.2.2.2) ; B : Traitement de visualisation « indice de position topographique » (TPI) dérivé du MNT LiDAR ; C : Coupe topographique du rempart du front de tête du fort de Méroux réalisée à partir des données microtopographiques issues du LiDAR ; D : Profil théorique du rempart d'une fortification construite entre 1885 et 1914 (d'après Guillot, 1949). E : diagramme de distribution des valeurs de pente théorique du fossé (d'après Guillot, 1949). 1 : Fortifications Séré de Rivières de Reims ; 2a : TRI ; 2b : RgI ; 3a : Moyenne des valeurs de pente de la zone périphérique ; 3b : Médiane des valeurs de pente de la zone périphérique ; 4 : Part du linéaire de murs du fossé encore en place ; 5 : Part de la superficie des cratères par rapport à la superficie totale ; 6 : Substrat géologique ; 7 : Crête du chemin couvert ; 8 : Crête extérieure ; 9 : Crête de feu (crête intérieure) ; 10 : Terre-plein ; 11 : Sol naturel ; 12 : Rempart ; 13 : Parapet ; 14 : Plongée ; 15 : Talus extérieur ; 16 : Glacis ; 17 : Mur de contrescarpe ; 18 : Mur d'escarpe ; 19 : Fossé ; 20 : Cunette ; 21 : Valeur de pente ; 22 : Fréquence associée.

De manière plus large, une histoire géomorphologique des marqueurs conflictuels et polémologiques inscrits dans les reliefs fortifiés reste encore à écrire, depuis les éperons barrés néolithiques et les mottes castrales médiévales jusqu'aux fortifications contemporaines, dont l'ampleur morphologique culmine avec l'avènement des guerres industrielles et les remaniements massifs de terrain qu'elles ont induits.

En définitive, l'intégration de ces reliefs dans la réflexion élargie sur la géodiversité proposée par Scammacca et Bétard (2026) apparaît particulièrement heuristique. Les débats récents soulignent en effet que la géodiversité ne peut plus être envisagée comme une simple diversité abiotique, mais comme un système dynamique et multidimensionnel, façonné par les interactions entre géosphère, biosphère et anthroposphère au sein de la zone critique terrestre.

Dans cette perspective, les forts Séré de Rivières illustrent de manière exemplaire la manière dont une géodiversité initiale constitue à la fois une contrainte et un levier pour l'action militaire, tout en étant profondément reconfigurée par celle-ci. La mise en défense du territoire entraîne ainsi une transformation durable des « géoformes », inscrivant les fortifications dans une trajectoire « géodiversifiante » propre aux dynamiques anthropiques de l'Anthropocène.

L'analyse des morphologies liées aux conflits sous le prisme de la géodiversité, envisagée dans ses dimensions agrégative, évaluative, spatio-temporelle et fonctionnelle, permet dès lors de dépasser les lectures cloisonnées entre enjeux (géo)patrimoniaux et (géo)environnementaux. Elle conduit à considérer ces reliefs comme des composantes à part entière des socio-géo-écosystèmes contemporains, dont les géofonctionnalités et services géosystémiques participent pleinement à l'organisation et à l'évolution des paysages hérités des conflits.

C'est à cette articulation entre lecture géomorphologique et compréhension territoriale que renvoient plus directement les perspectives ouvertes par ce travail. Appliquée au Pays rémois, cette lecture géomorphologique offre un cadre renouvelé pour considérer les fortifications comme des composantes à part entière du paysage local et permet de réinscrire, sur des bases scientifiques explicites, les réflexions anciennes relatives à leur mise en valeur dans la perspective d'une cohérence paysagère à l'échelle de la ceinture fortifiée.

ARCHIVES

La liste suivante regroupe l'ensemble des fonds et cotes consultés au cours de la recherche. Tous n'ont pas donné lieu à une citation directe dans le manuscrit, mais ont contribué au cadre documentaire et à la contextualisation de l'étude.

Bibliothèque Nationale de France (BNF)

GE DD-986 : Atlas de Poinsignon.

GEC-420 : Carte de l'arrondissement de Reims, extraite de la carte de France au 1/100 000 dressée par le service vicinal par ordre du ministre de l'intérieur.

GE CC 698 : Carte spéciale des régions dévastées. 34 NO, NE, SO, SE, Reims.

Service Historique de la Défense (SHD)

AI : Archives de l'armée de l'air

AI 1 A : Aéronautique de la Première Guerre mondiale, Grand Quartier Général

AI 1 A 318 : Photographies aériennes (Reims et alentours).

AI 1 A 319 : Photographies aériennes (Reims et alentours).

AI 1 A 320 : Photographies aériennes (Reims et alentours).

AI 1 A 321 : Photographies aériennes (Reims et alentours).

AI 1 A 322 : Photographies aériennes (Reims et alentours).

AI 1 A 354 : Photographies aériennes (Reims et alentours).

GR : Archives de la Guerre et de l'Armée de Terre

GR 6 M : Fonds de carte (plans directeurs)

GR 6 M LVIB1C 31-1 : Plan directeur de Beine, 1er novembre 1915, 1/20 000.

GR 6 M LVIB1C 31-2 : Plan directeur de Beine, 13 novembre 1916, 1/20 000.

GR 6 M LVIB1C 31-3 : Plan directeur de Beine, 30 octobre 1917, 1/20 000.

GR 6 M LVIB1C 47-1 : Plan directeur de Brimont, 1er avril 1915, 1/20 000.

GR 6 M LVIB1C 47-2 : Plan directeur de Brimont, 1er avril 1916, 1/20 000.

GR 6 M LVIB1C 47-3 : Plan directeur de Brimont, 16 juillet 1917, 1/20 000.

GR 6 M LVIB1C 47-6 : Plan directeur de Brimont, 4 octobre 1918, 1/20 000.

GR 6 M LVIB1C 223-1 : Plan directeur de Reims, 20 mai 1916, 1/20 000.

GR 6 M LVIB1C 223-2 : Plan directeur de Reims, 26 mars 1917, 1/20 000.

GR 6 M LVIB1C 223-3 : Plan directeur de Reims, 15 août 1917, 1/20 000.

GR 6 M LVIB1B 71-2 : Plan directeur de Brimont SE, 5 avril 1918, 1/10 000.

GR 6 M LVIB1B 37 : Plan directeur de Bazancourt SO, 13 mai 1917, 1/10 000.

GR 6 M LVIB1A 345-1 : Plan directeur de Courcy, 15 juillet 1916, 1/5 000.

GR 6 M LVIB1A 131-2 : Plan directeur de la Pompelle, 17 février 1918, 1/5 000.

GR 6 M LVIB1A 55 : Plan directeur de Cernay-lès-Reims, 12 octobre 1917, 1/5 000.

GR 6 M LVIB1B 41-1 : Plan directeur de Beine NO, 27 août 1917, 1/10 000.

GR 6 M LVIB1B 41-2 : Plan directeur de Beine NO, 2 mars 1918, 1/10 000.

GR 6 M LVIB1B 41-3 : Plan directeur de Beine NO, 16 septembre 1918, 1/10 000.

GR 6 M LVIB1B 263-1 : Plan directeur de Reims SE, 16 décembre 1917, 1/10 000.

GR N : Troisième République (1872-1940) et GR NN (supplément)

GR 7 N 1786 : Mémoires d'étude sur la 2e ligne (Aisne, Seine) d'Huderbeau (1874) ; sur les armées de la falaise de champagne de Dancy (1874-1875).

GR 7 N 1810 : Inspections des places fortes (1879, 1908-1912).

GR 7 N 1812 : Informations générales et note sur la violation de la neutralité belge (1876-1889).

GR 7 N 1819 : Défense des voies de communication (1891-1893) et plan XVII de Reims (1914).

GR 7 N 1852 : Étude de l'organisation défensive d'Épinal et de la Haute-Moselle.

GR 7 N 1937 : Voyages de souverains étrangers, visite du tsar de Russie, Châlons-sur-Marne, Bétheny (1896, 1901).

GR 7 N 1938 : Voyages de souverains étrangers, visite du tsar de Russie, Châlons-sur-Marne, Bétheny (1896, 1901).

GR 16 N 2350 : Reims (Ve armée), Woëvre (VIIIe armée), Verdun (IIe armée) : limites, organisation gares régulatrices, travaux de voies ferrées, hospitalisation et dépôts d'éclopés (1916-1918).

GR 16 N 2412 : Cartes des arrières (1918) : routes et camps, chemins de fer, voies navigables, communications et services, installations diverses, zones de cantonnements, *etc.* ; Alsace, Lorraine, Verdun, Woëvre, Reims, Champagne, Aisne, Oise, Somme, Flandre, zone anglaise, Belgique.

GR 16 N 2815-2816 : Divers dont chemins de fer de la banlieue de Reims (janvier-juillet 1917).

GR 18 N 268-269 : Opérations de Champagne (mai 1915-janvier 1917) : rapport sur la préparation ; notes sur le tir contre avions (1915) ; emplacements de batteries, situations de l'artillerie lourde, *etc.* ; études sur le repérage par le son, plans d'action et de défense, défense de Reims, enquête sur l'affaire de Navarin, *etc.*

GR 19 N 747 : Opérations en Champagne fin 1917 et 1er semestre 1918 : travaux des 2e et 3e positions, défense de Reims.

GR 19 N 919-922 : Opérations menées à la Pompelle, Reims, Brimont, dans la vallée de l'Ardre (1914-1918).

GR 19 N 1093-1095 : Bataille Montagne de Reims (4e bataille de Champagne).

GR 9 NN : Organisation des places fortes, armement, magasins à poudre et infrastructures

GR 9 NN 4 72 4 : Demande de construction dans les zones de servitudes.

GR 9 NN 4 144 1 : Occupation des forts en temps de paix, hygiène, surveillance, logement, *etc.*

GR 9 NN 4 144 3 : Organisation du tir dans les places.

GR 9 NN 4 147 2 : Projet d'instruction et de mise en œuvre de béton de ciment.

GR 9 NN 4 156 1 2 : Révision de l'armement de Reims (1888-1893).

GR 9 NN 4 269 3 : Expérience sur l'éclairage des places du nord-est (1893-1912).

GR 9 NN 4 270 1 : Remplacement de l'approvisionnement de l'éclairage (1907-1918).

GR 9 NN 4 271 3 : Rapport sur l'éclairage à la lampe à pétrole dans la place de Reims (1897-1907).

GR 9 NN 4 282 : Instructions générales sur les magasins à poudre (utilisation, sécurité, assainissement, *etc.* ; 1842-1913).

GR 9 NN 4 283 1 : Emploi des paratonnerres dans les magasins à poudre.

GR 9 NN 4 283 2 : État des lieux des magasins à poudre (1875-1892).

GR 9 NN 4 283 3 : Expérience sur l'aération des magasins à poudre.

GR 9 NN 4 283 4 : Instruction sur la protection contre la foudre des magasins à poudre.

GR 9 NN 4 283 5 : Lutte contre l'humidité et la condensation des magasins à poudre.

GR 9 NN 4 284 1 : Protection contre la foudre des magasins à poudre.

GR 9 NN 4 284 2 : Informations générales sur les magasins à poudre (1907-1909).

GR 9 NN 4 287 3 : Note générale sur les magasins-caverne de Reims (1897-1914).

GR 9 NN 4 380 2 : Étude sur l'emploi des voies ferrées dans la défense des camps retranchés (1880-1888).
GR 9 NN 4 380 3 : Organisation des réseaux de voies ferrées des camps retranchés (1887-1889).
GR 9 NN 4 403 1 : Expériences de tir sur un fort antérieur à 1885 (1908).
GR 9 NN 4 405 1 : Étude d'un appareil de mesure de la hauteur d'eau ; analyse et fonctionnement des hydromètres.
GR 9 NN 4 407 1 : Renseignements sur les fortifications et l'artillerie allemandes (1914-1915).
GR 9 NN 4 413 2 : Laboratoire de ciment de Paris.
GR 9 NN 4 413 3 : Rapport de la commission de récupération des matériaux et déchets (1917-1918).
GR 9 NN 4 460 1 : Étude de l'architecture des casernements (1874-1875).
GR 9 NN 4 1038 3 : Classement des places de guerre et servitudes (1791-1938).
GR 9 NN 4 1039 1 : Ouvrages fortifiés type abri, échelle, escalier, *etc.* (1878-1899).

GR V : Archives techniques du Génie

GR 1 V F 224 : Procès-verbaux de réunion de la commission mixte des travaux publics de la Marne (1874-1898).
GR 1 V H 2069 : Plans des fortifications de Reims (1866, 1868, 1896).
GR 1 V H 2077 : Plan au 1/20 000 de Reims.
GR 1 V H 2079 : Feuilles de renseignements sur les « nouveaux forts » (1880-1881).
GR 1 V H 2141 : Plan des environs de Reims au 1/20 000 (1879).
GR 1 V H 2197 : Projets de servitudes et d'acquisitions militaires.

GR 1 V R : Architecture, matériaux et techniques de construction du génie militaire

GR 1 V R 1 101 : Fourneaux, marmites, cuisines, concours d'appareils de cuisines (1887-1895), cuisines roulantes : correspondance, rapports, notes, mémoires, plans, notices, instruction, état estimatif des dépenses, procès-verbaux d'expérience.
GR 1 V R 1 113 : Casernes et écuries (1874-1879) - Projets, construction, mise au point des modèles : correspondance, rapports, procès-verbal, mémoires, plans, tableaux de prix, notes, circulaires, correspondance, notices, conférences, photographies, règlements, instructions.
GR 1 V R 1 114 : Casernes et écuries (1875-1880).
GR 1 V R 1 115 : Casernes et écuries (1882-1883).
GR 1 V R 1 116 : Casernes et écuries (1873-1904).
GR 1 V R 1 119 : Manèges, hangars (1880) - Projets, construction : rapports, correspondance, notes, plans, *etc.*
GR 1 V R 1 121 : Ameublement des casernes (1872-1877) : rapports, mémoires, plans, notes, extraits des ordonnances, cahier des charges, correspondance, devis.
GR 1 V R 1 132 : Citernes.
GR 1 V R 19-20 : Croquis d'exécution des principaux ouvrages de défense en cours de construction (1877-1882).
GR 1 V R 83 : Terrassements (déblais, remblais ; 1688-1893) : mémoires, plans, instructions, états estimatifs, correspondance, notes, notices, rapports, essais.
GR 1 V R 84 : Gazonnages (1745-1748), plantations de rempart et de glacis, haies vives (1753-1875) : mémoires, plans, instructions, correspondance, notes, rapports.
GR 1 V R 86 : Matériaux (chaux, plâtres, sable, pouzzolane, mortier, ciments, bétons, machines à mortier ; 1820-1896) : mémoires, notes, correspondance, plans, essais, procès-verbaux d'expérience, rapports, instructions.

GR 1 V R 87 : Matériaux (chaux, plâtres, sable, pouzzolane, mortier, ciments, bétons, machines à mortier ; 1884-1903) : mémoires, notes, correspondance, plans, essais, procès-verbaux d'expérience, rapports, instructions.
GR 1 V R 91 : Fondations, poussées de terre, murs de bâtiment, murs de revêtement (1828-1895) : mémoires, rapports, plans, correspondances, notes, essai.
GR 1 V R 93 : Revêtements en décharge, construction et assainissement (1861-1877) : correspondance, mémoires, rapports, plans, notices, procès-verbaux d'expérience, notes, rapports.
GR 1 V R 94 : Poussées et constructions des voûtes (1728-1902) : mémoires, plans, notes, notices, correspondance.
GR 1 V R 96 : Chapes de voûte et terrasses (1867-1887) : mémoires, plans, rapports, instructions, notices, notes, cahiers des charges, marchés, correspondance, instructions, plans.
GR 1 V R 97 : Constructions diverses (pans de bois, pavés, planchers, escaliers, latrines, fosses d'aisance ; 1736-1890) : mémoires, plans, instructions, notes, comptes rendus d'expérience, rapports, correspondance, notes.
GR 1 V R 100 : Résistance des bois, du fer, planchers, charpentes (1687-1897) et couvertures (1808-1856) : mémoires, plans, rapports, notes, notices, procès-verbal d'expérience, correspondance.
GR 1 V R 102 : Appareils de chauffage et de ventilation, poêles et cheminées (1716-1917) : mémoires, plans, notes, rapports, notices, correspondance, états comparatifs des dépenses.
GR 1 V R 103 : Menuiserie, serrurerie, vitrerie, scellements, peintures (1795-1893) et paratonnerres (1789-1902) : mémoires, plans, rapports, comptes rendus d'expérience, notes.
GR 1 V R 108 : Magasins à poudre (1848-1889) — Projets, études, construction : mémoires, plans, instructions, notes, avis du Comité des fortifications, états estimatifs des dépenses, devis, rapports, instructions, correspondance, procès-verbaux de conférence, règlement.
GR 1 V R 139 : Dessèchements, conduites d'eau, fontaines, puits artésiens (1684-1885) : devis, correspondance, mémoires, plans, notices, notes, tableaux.
GR 2 V 55 : Matériels de chemin de fer dont rapport d'essai de l'utilisation des voies ferrées dans la défense des places fortes.
GR 2 V 69 : Mesures générales dont organisation des places fortes, tracés des organes, aménagements et assainissement (1886-1899).
GR 2 V 79 : Organisation des magasins à poudre et des fourneaux de destruction des munitions (1901-1938).
GR 2 V 97 : Reims - réparations aux forts de Saint-Thierry et Nogent-l'Abbesse (1903-1909).
GR 2 V 105 : Croquis de construction de la batterie de Loivre (1877-1880).
GR 2 V 120-121 : Exercices de mines aux forts de Witry-lès-Reims (1912) et Brimont (1913)
GR 2 V 162 : Télégraphe, téléphone, colombier général (1876-1886).
GR 2 V 166 : Expérience de franchissement de fossé et de destruction des quilles (dossier 1).
GR 2 V 172 : Rapports et cartes de l'expérience de la Malmaison (1886).
GR 2 V 185 : Étude allemande d'un cas concret d'attaque et de défense d'une place forte (1906).
GR 2 V 195 : Commission méthodes d'essai matériaux construction 1894-1898.
GR 2 V 225 : Notes, rapports et points sur la Marne (1918).
GR 4 V T 346 1 : Reims. Fort central de Brimont ; fort de Nogent-l'Abbesse.

GR W : Archives techniques de l'artillerie

GR 3 W 3 : Informations générales (1876-1888).
GR 3 W 4 : Réorganisation des forts, des magasins et des chemins de fer (1888-1932).

GR 3 W 5 : Dépêches ministérielles, rapports, croquis, concernant l'emmagasinement, le classement et la construction de magasins à poudre (Paris et autres ; 1857-1889).
GR 3 W 9 : Notes diverses sur l'armement dont 6e région (1873-1877).
GR 3 W 10 : Approvisionnement des places fortes.
GR 3 W 17 : Considérations stratégiques dont notes général Frossard sur l'organisation du système défensif en Champagne (1873), considérations sur la reconstitution de la frontière est (1873), congrès sur les lignes défensives de la France (Piette, 1873), dépêches sur la réorganisation de la 6e région militaire, rapports sur la défense d'Épernay (1877).
GR 3 W 18 : Considérations stratégiques dont notes sur les forts Haute-Moselle et d'Épinal avec croquis.
GR 3 W 64 : Dépêches ministérielles, tableaux, avis du comité, notes, rapports de commissions, projets, croquis concernant les bouches à feu, révision de l'armement de Paris, la configuration du terrain dans un rayon de 40 plans de Paris, l'enceinte de Paris et ses forts, l'approvisionnement, le tir de l'artillerie contre l'enceinte et les forts de Paris, forts à construire, l'organisation défensive (1867-1879).
GR 3 W 65 : Dépêches ministérielles, tableaux, avis du comité, notes, rapports de commissions, projets, croquis concernant la défense de Paris (1879-1898).
GR 3 W 69 : La Fère / Reims - proposition de travaux d'artillerie et de génie dont étude de Brimont.
GR 3 W 78 : Nancy, fortifications de Vauban (1791) ; dépêches ministérielles, rapport et avis commun (artillerie et génie) au sujet des projets d'armement des ouvrages de Frouard (1881) ; conférences sur la situation frontière et Nancy (1886) ; Sur la question des fortifications (1898) ; conférence du commandant Boëlle (1898) ; défense des forts de Manonviller et Pont Saint-Vincent, carte des positions des batteries de la direction de Nancy.
GR 3 W 79 : Dépêches ministérielles, procès-verbaux, rapports de commission sur la place de Toul (1802-1914).
GR 3 W 125 : Instruction batterie artillerie (1916-1924).
GR 3 W 130 : Tableaux de la composition, des accessoires, et des outils potentiels associés à l'ALVF.
GR 3 W 143 : ALVF - composition, matériel, *etc.*

Archives Départementales de la Marne (AD51)

M : Police et administration générale : fonds de la préfecture de la Marne (1M-202M)

121/122 M : Dénombrement de la population (1799-1936)
122 M 174 : Berru, Nogent-l'Abbesse (1872).
122 M 175 : Brimont, Courcy, Loivre (1872).
122 M 195 : Berru, Nogent-l'Abbesse (1876).
122 M 196 : Brimont, Courcy, Loivre (1876).
122 M 215/2 : Berru, Nogent-l'Abbesse (1881).
122 M 216 : Brimont (1881).
122 M 236 : Berru, Nogent-l'Abbesse (1886).
122 M 254/2 : Berru, Nogent-l'Abbesse (1891).
122 M 276 : Berru, Nogent-l'Abbesse (1896).

P : Finances, cadastres, postes

3 P : Cadastre et remembrement

3 P 51/2 : États de section de la commune de Berru - 1.
3 P 51/3 : États de section de la commune de Berru - 2.
3 P 88/2 : États de section de la commune de Brimont.
3 P 146/2 : États de section de la commune de Chenay.
3 P 185/2 : États de section de la commune de Courcy.
3 P 267/2 : États de section de la commune de Fresne.
3 P 300 : États de section de la commune d'Hermonville.
3 P 340 : États de section de la commune de Loivre.
3 P 389/2 : États de section de la commune de Montbré.
3 P 418/2 : États de section de la commune de Nogent-l'Abbesse - 1.
3 P 418/3 : États de section de la commune de Nogent-l'Abbesse - 2.
3 P 460/2 : États de section de la commune de Pouillon.
3 P 465/2 : États de section de la commune de Prunay.
3 P 466/2 : États de section de la commune de Puisieulx.
3 P 583/2 : États de section de la commune de Taissy.
3 P 688/2 : États de section de la commune de Witry-lès-Reims.
3 P 753 : Plans cadastraux de la commune de Berru.
3 P 791 : Plans cadastraux de la commune de Brimont.
3 P 851 : Plans cadastraux de la commune de Chenay.
3 P 892 : Plans cadastraux de la commune de Courcy.
3 P 972 : Plans cadastraux de la commune de Fresne.
3 P 1005 : Plans cadastraux de la commune d'Hermonville.
3 P 1044 : Plans cadastraux de la commune de Loivre.
3 P 1094 : Plans cadastraux de la commune de Montbré.
3 P 1121 : Plans cadastraux de la commune de Nogent-l'Abbesse.
3 P 1163 : Plans cadastraux de la commune de Pouillon.
3 P 1169 : Plans cadastraux de la commune de Puisieulx.
3 P 1288 : Plans cadastraux de la commune de Taissy.
3 P 1394 : Plans cadastraux de la commune de Witry-lès-Reims.

7 P Eaux et forêts (1800-1942)

7 P 256 : Forêts particulières (Berru, Brimont), demandes de défrichement (1813-1939).
7 P 461 : Dommages de la Première Guerre mondiale, forêts publiques classées par secteur.
7 P 465 : Dommages de la Première Guerre mondiale, forêts particulières classées par secteur.
7 P 468 : Dossiers d'évaluation des dommages de guerre (commission).

O : Administration communale

2 O 487 : Eau (1844-1937) - projet d'assèchement du magasin souterrain de la vigie de Berru.

U : Justice

2 U : Conseil de Préfecture

2 U 732 : Litige judiciaire sur l'occupation temporaire de terrains privés lors de la construction du fort de Witry-lès-Reims (1884-1886).

2 U 733 : Litige judiciaire sur l'occupation temporaire de terrains privés lors de la construction des forts de Berru et Nogent-l'Abbesse (1876-1886).

2 U 734 : Accident dans le fort de Witry-lès-Reims (1934).

BIBLIOGRAPHIE

ACCOULON D. (2024) – Les ailes de la gloire : les « As » de l'aviation dans les sociétés allemande et française (1914-1939) : Thèse de doctorat en histoire contemporaine, soutenue le 09 décembre 2023 à l'université Paris Nanterre en cotutelle avec Technische Universität Braunschweig, sous la direction de Annette Becker, Christian Kehrt. *Trajectoires*, 17. DOI : 10.4000/trajectoires.10762.

AILLERET C. (1948) – *Histoire de l'armement*. Presses universitaires de France, Paris, Que sais-je ?, 301, 127 p.

ALLOUC J., TABORELLI P., DEVOS A. (2018) – Le front de Champagne. In : BERGERAT F. (éd.), *14-18, La Terre et le Feu. Géologie et géologues sur le front occidental*. Coédition AGBP-COFRHIGÉO-SGN, Mém. hors-série n°10 de l'AGBP, 183-197.

AMAT J.-P. (1987) – Guerre et milieux naturels : les forêts meurtries de l'Est de la France, 70 ans après Verdun. *L'Espace géographique*, 16 (3), 217-233. DOI : 10.3406/spgeo.1987.4253.

AMAT J.-P. (1993) – Le rôle stratégique de la forêt - 1871-1914. Exemples dans les forêts lorraines. *Revue Historique des Armées*, 190 (1), 62-69. DOI : 10.3406/rharm.1993.4220.

AMAT J.-P. (1999) – *La forêt entre guerres et paix, 1870-1995 : étude de biogéographie historique sur l'arc meusien de l'Argonne à la Woëvre (France)*. Thèse de doctorat, Université de Lille 1, Lille, 1285 p.

AMAT J.-P. (2024) – *Les forêts de la Grande Guerre : histoire, mémoire, patrimoine*. Sorbonne Université Presses, Paris, 632 p. ISBN : 978-2-84050-966-0.

AMAT J.-P., BECKER M. (1994) – La ville et ses forts, du splendide isolement aux relations de voisinage. In : *Fortifications et patrimoine militaire en Île-de-France : mémoire, obsolescence, conservation, réutilisation ?* CREPIF, Paris, 73-82.

ANCELIN P.-Y. (2019) – *Géoarchéologie en Forêt de Spincourt par croisement de données LiDAR, archéologiques et documentaires*. Mémoire de Master 1, Université de Lorraine, Nancy, 59 p.

ANCELIN P.-Y. (2020) – *Approche archéogéographique du Saint-Mont (Vosges), par croisement de données LiDAR, documentaires et archéologiques*. Mémoire de Master 2, Université de Lorraine, Nancy, 162 p.

ANCELIN P.-Y., BERTHE J., BEUCHER J., DEVOS A., BENOIT A., KRAUFFEL T. (2025) – Approches anthropogéomorphologique et cindynique (LiDAR, SIG) des terrains artificiels de guerre français. *Journées des Jeunes Géomorphologues,* 2025, Caen, Poster. URL : https://hal.science/hal-05138239v1

ANCELIN P.-Y., BERTHE J., KRAUFFEL T., DEVOS A., FRONTEAU G. (2025) – *Étude sur les vieilles forêts (ou forêts subnaturelles) de la Montagne de Reims : caractérisation de l'ancienneté de l'état boisé et de la maturité des peuplements forestiers par croisement de données LiDAR et documentaires (SIG, R)*. Rapport d'étude, GEGENA - PNR MR, Reims, 150 p.

ANCELIN P.-Y., BERTHE J., KRAUFFEL T., DEVOS A., LARATTE S. (2024) – A Geoheritage perspective on « Séré de Rivières » fortifications: LiDAR contributions to the assessment of war landform erasure in the Reims fortified belt (Marne, France). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 30, (4), 269-295. DOI : 10.4000/13t2i.

ANCELIN P.-Y., BERTHE J., PERARNAU R., DEVOS A., BOLLOT N. (accepté) – Analyse critique de la qualité de données Lidar : approche comparative multisectorielle (Fossard, Vosges ; Montagne de Reims et "Reims nord", Marne). In : KRAEMER C. (dir.), *Remuer Ciel et Terre. L'apport du LiDAR en archéologie*, Actes du colloque de Saint-Étienne-lès-Remiremont, 2022.

ANCELIN P.-Y., DEVOS A., LAPORTE P., BERTHE J., KRAUFFEL T. (soumis) – Approches géohistorique et biogéographique des fortifications « Séré de Rivières » : exemple du fort de Brimont (ceinture de Reims, Marne, France). *Revue Géographique de l'Est*.

ANCELIN P.-Y., DEVOS A., LARATTE S., BERTHE J. (2023) – The "Séré de Rivières" type fort: geomorphological approaches to polemolandscapes (GIS, LiDAR, military archives). Example of the fortified belt of Reims (France). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 29 (3), 153-169. DOI : 10.4000/w1v4.

ANCELIN P.-Y., LARATTE S., FRONTEAU G., DEVOS A., BERTHE J. (2024) – Quels géomatériaux pour la construction de la ceinture fortifiée « Séré de Rivières » de Reims ? Exemple du fort de Nogent-l'Abbesse (Marne, France). *Journées des Jeunes Géomorphologues*, 2024, Reims, Poster. URL : https://hal.science/hal-04075050v1

ANDERSSON G. K. S., CONCEPCIÓN E. D., HIPÓLITO J., MORALES M. B., PERSSON A. S. (2021) – Editorial: Habitat Modification and Landscape Fragmentation in Agricultural Ecosystems: Implications for Biodiversity and Landscape Multi-Functionality. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9, 799322. DOI : 10.3389/fevo.2021.799322.

ANTOINE P. (1993) – Le système de terrasses du Bassin de la Somme : Modèle d'évolution morpho-sédimentaire cyclique et cadre paléoenvironnemental pour le Paléolithique. *Quaternaire*, 4 (1), 3-16. DOI : 10.3406/quate.1993.1986.

ANTROP M. (2000) – Geography and Landscape science. *Belgeo*, 1-2-3-4, 9-36. DOI : 10.4000/belgeo.13975.

ARAS-GAUDRY A. (2025) – *Le patrimoine en carreaux de terre crue de Champagne : Redécouverte d'une architecture vernaculaire oubliée pour penser une éthique environnementale de la construction*. Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, Reims, 393 p.

ARCHAMBAULT M., LHÉNAFF R., VANNEY J. R. (1965) – *Documents et méthode pour le commentaire de cartes*. Masson, Paris, 80 p.

ARCHER C. I., FERRIS J. R., HERWIG H. H., TRAVERS T. H. E. (2002) – *World history of warfare*. University of Nebraska Press, Lincoln, 638 p.

ARGHAVANIAN A., LELOĞLU U. M. (2024) – Extraction and classification of channels from LiDAR in plains by channel tracking. *Environmental Modelling & Software*, 171, 105838. DOI : 10.1016/j.envsoft.2023.105838.

ARMIT I., KNÜSEL C., ROBB J., SCHULTING R. (2007) – Warfare and violence in prehistoric Europe: an introduction. In : POLLARD T. (éd.), *War and sacrifice*. Brill. Leiden, 1-11.

ARNAUD J.-L. (2022a) – F1879 France, 1:100 000, 1879-1936, 587 feuilles, ministère de l'Intérieur, service vicinal. In : ARNAUD J.-L. (dir.), *La carte de France : Histoire et techniques*. Parenthèses, Marseille, 212-215. ISBN : 978-2-86364-330-3.

ARNAUD J.-L. (2022b) – F1889 France, 1:50 000, 1889-1957, 965 feuilles, amplification du Type 1889. In : ARNAUD J.-L. (dir.), *La carte de France : Histoire et techniques*. Parenthèses, Marseille, 262-265. ISBN : 978-2-86364-330-3.

ARNAUD J.-L. (2022c) – F1914 Est de la France, plans directeurs de tir, 1914-1944, 1:20 000, 1:10 000 et 1:5 000, env. 375 feuilles au 1:20 000. In : ARNAUD J.-L. (dir.), La *carte de France : Histoire et techniques*. Parenthèses, Marseille, 302-307. ISBN : 978-2-86364-330-3.

ARNAUD J.-L. (2022d) – F1922 France, 1:50 000, 1922-2010, 1092 feuilles. In : ARNAUD J.-L. (dir.), *La carte de France : Histoire et techniques*. Parenthèses, Marseille, 312-319. ISBN : 978-2-86364-330-3.

ARNAUD J.-L. (2022e) – *La carte de France : Histoire et techniques*. Parenthèses, Marseille, 444 p. ISBN : 978-2-86364-330-3.

ASADPOUR A. (2016) – From Landscape of Conflict to Landscape of Defense; Concepts and Relations of Landscape to War. *Manzar*, 34, 50-57.

ASCHAN-LEYGONIE C., CUNTY C., DAVOINE P.-A. (2019) – *Les systèmes d'information géographique : Principes, concepts et méthodes*. Armand Colin, Paris, 270 p. ISBN : 978-2-200-61718-9.

ASSOCIATION VAUBAN (éd.) (1999) – *Actes du colloque Séré de Rivières (Épinal 14-15-16 septembre 1995)*. Association Vauban, Paris, 398 p.

AUER-VÉRAN F. (2008) – *Archives de l'aéronautique militaire de la première guerre mondiale, répertoire numérique détaillé de la série A (1914-1919) et guide des sources*. Service Historique de la Défense, Paris, 567 p.

AUMONIER J.-M., ECK A. (1873) – *Notice sur la constitution géologique de la montagne de Berru*. Coopérative de Reims, Reims, 86 p.

BACCHUS M., DUPUIS J. C. (1990) – Une nouvelle carte de France par levé cadastral : bilan d'une idée révolutionnaire. In : *Cartes, cartographes et géographes, Actes du 114e Congrès National des Sociétés Savantes*. CTHS, Paris, 53-61.

BAKKOUCH L., BIHR H., RUGERRI P., FOLLIN J.-M., SIMONETTO E., TOUZARD P. (2015) – Comparaison de méthodes de recalage d'images pour le géoréférencement de clichés anciens. *XYZ*, 142, 15-23.

BARDE Y. (1996) – *Histoire de la fortification en France*. Presses Universitaires de France, Vendôme, Que sais-je ?, 3106. 125 p.

BARDON A., MONTILLET P., ROUSSEAU A. (2014) – *Le camp retranché de Paris, un nouveau regard sur les franges de l'agglomération*. Institut d'aménagement et d'urbanisme de la région Île-de-France, Paris, 109 p.

BARRÉ M. (2008) – *Document d'objectifs du site Natura 2000 FR2100274 « Marais et pelouses du Tertiaire au nord de Reims »*. DOCOB Natura 2000, DIREN Champagne-Ardenne, Châlons-en-Champagne, 310 p.

BARRÉ O. (1898) – La géographie militaire et les nouvelles méthodes géographiques. *Revue du génie*, 16, 323-332.

BARRÉ O. (1899) – La géographie militaire et les nouvelles méthodes géographiques (suite). *Revue du génie*, 17, 473-512.

BARROS M. (1989) – *La position La Fère-Soissons 1870-1900*. Mémoire de maîtrise, Université de Paris I, Paris, 118 p.

BARROS M. (1996) – Les forts de La Fère, Laon et Soissons de 1874 à 1918. *Mémoires de la fédération des sociétés d'histoire et d'archéologie de l'Aisne*, 41, 49-80.

BARROS M. (1999) – La deuxième ligne dans le système Séré de Rivières, 1872-1914. In : ASSOCIATION VAUBAN (éd.), *Actes du colloque Séré de Rivières d'Épinal du 14-15-16 septembre 1995*. Association Vauban, Paris, 202-244.

BARROS M., ROUCAUD M., ACCARIE-PIERSON O. (2022) – *Les forteresses de l'Empereur : Napoléon et ses ingénieurs militaires dans l'Europe en guerre*. SilvanaEditoriale, Milano. ISBN : 978-88-366-5041-5.

BARTOUT P. (2011) – L'apport du cadastre napoléonien aux problématiques spatiales des retenues d'eau. *Revue Géographique de l'Est*, 51 (3-4). DOI : 10.4000/rge.3382.

BATTIAU-QUENEY Y. (1993) – *Le relief de la France : coupes et croquis*. Masson, Paris, Géographie. 252 p. ISBN : 978-2-225-84145-3.

BEN SUSSAN D., MONNET J.-M., FUHR M. (2022) – *Caractérisation du degré de maturité des forêts du Morvan et cartographie des forêts matures*. Rapport d'étude, LESSEM-INRAE, Grenoble, 31 p.

BEN SUSSAN D., MONNET J.-M., FUHR M., BELLIFA M., BONHÊME I., DESQUEYROUX A. (2024) – *Vers une méthode intégrée d'identification des forêts subnaturelles sur un territoire*. Mémoire technique, INRAE, Grenoble, 58 p.

BENNETT R., COWLEY D., GAFFNEY C., OPITZ R., RÁŠOVÁ A. B., ZERBONI A., CORNS A., RUSSELL A., VILLAREJO A. J. O., MANN B., COLLARO C., NOVÁK D., MLEKUŽ VRHOVNIK D., RENSINK E., FOVET E., FONTANA G., KRAMER I., HERZOG I., STREATFEILD-JAMES J., EOGAN J., ZACHAR J., DE KORT J. W., WAAGEN J., LAMBERS K., CHALLIS K., TEALE K., KILLORAN L., BANASZEK Ł., MEYER-HESS M. F., RYBSKA M., KOSTAMOVAARA M., OAKEY M., DONEUS M., KECHEVA N., CRABB N., ANTTIROIKO N., TRIER Ø. D., RISBØL O., CROW P., O'KEEFFE P., EVANS S., POPOVIĆ S., CRUTCHLEY S., DAVIS S., ZOLDOSKE T., DRIVER T., FILDES T., VERSCHOOF-VAN DER VAART W. B., KOKALJ Ž. (2025) – *Guidelines for the use of Airborne Laser Scanning (Lidar) in Archaeology (EAC Guidelines 10)*. European Archaeological Council, Bruxelles, 174 p.

BENNETT R., WELHAM K., HILL R. a., FORD A. (2012) – A Comparison of Visualization Techniques for Models Created from Airborne Laser Scanned Data. *Archaeological Prospection*, 19 (1), 41-48. DOI : 10.1002/arp.1414.

BERNÈDE A. (1999) – L'enseignement de la fortification à l'École supérieure de guerre avant la première guerre mondiale. In : ASSOCIATION VAUBAN (éd.), *Actes du colloque Séré de Rivières d'Épinal du 14-15-16 septembre 1995*. Association Vauban, Paris, 61-84.

BERTHE J. (2024) – *Apport du LIDAR aéroporté à la compréhension des hydrosystèmes. Exemple de de la Montagne de Reims*. Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, Reims, 412 p. URL : hal.science/tel-04491099v1

BERTHE J., ANCELIN P.-Y. (2024) – Hydrosystèmes anthropiques de la Montagne de Reims. In : GEORGEL-DEBEDDE S., HUT C., MARTIN V., POLI S. (éd.), *Le passé au fil de l'eau : L'eau et ses enjeux dans les sociétés anciennes*. Éditions de la Sorbonne, Paris. ISBN : 979-10-351-1008-6.

BERTHE J., DEVOS A., LEJEUNE O., BOLLOT N., FRONTEAU G., PERARNAU R., ORTONOVI S. (2022) – Apport du LiDAR aéroporté sur la compréhension des facteurs d'exokarstification en contexte de bas plateau, exemple de la Montagne de Reims (France). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 28 (4), 207-221. DOI : 10.4000/geomorphologie.16829.

BERTHE J., LEJEUNE O., DEVOS A., BOLLOT N. (2021) – Imagerie LiDAR et cartographie semi-automatique de l'exokarst de la Montagne de Reims (Champagne, France). *Karstologia*, 78 (1), 41-48. DOI : 10.3406/karst.2021.3262.

BERTRAND G. (1978) – Le paysage entre la Nature et la Société. *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, 49 (2), 239-258. DOI : 10.3406/rgpso.1978.3552.

BÉTARD F. (2017) – *Géodiversité, biodiversité et patrimoines environnementaux. De la connaissance à la conservation et à la valorisation*. Habilitation à diriger la recherche, Université Paris-Diderot, Paris, 270 p.

BEWLEY R. (2005) – Aerial Archaeology. The First Century. In : BOURGEOIS J., MEGANCK M. (éd.), *Aerial photography and archaeology 2003: a century of information*. Academia Press, Ghent, 15-30. ISBN : 978-90-382-0782-7.

BEWLEY R. H., CRUTCHLEY S. P., SHELL C. A. (2005) – New light on an ancient landscape: lidar survey in the Stonehenge World Heritage Site. *Antiquity* 79, (305), 636-647. DOI : 10.1017/S0003598X00114577.

BEYLOT A. (2009) – Military Aerial Photographs, from 1914 to the present. Survey of the French sources. In : COWLEY D. C. (éd.), *Images of Conflict: Military Aerial Photography and Archaeology*. Cambridge Scholars Publishing, Newcastle-upon-Tyne, 135-149. ISBN : 978-1-4438-0314-4.

BILLARD C., CARPENTIER V., JACQUEMOT S., LANDOLT M., LEGENDRE J.-P. et MARCIGNY C. (éd.) (2024) – *Archéologie des conflits contemporains : méthodes, apports et enjeux d'une archéologie en construction : actes des colloques de Verdun à Caen (2018-2019)*. Presses universitaires de Rennes, Rennes, 416 p. ISBN : 978-2-7535-9721-1.

BIRAN A., PORIA Y., OREN G. (2011) – Sought experiences at (dark) heritage sites. *Annals of Tourism Research*, 38 (3), 820-841. DOI : 10.1016/j.annals.2010.12.001.

BLOND S. (2009) – L'atlas de Trudaine et ses apports en archéologie : L'exemple de l'ancienne généralité de Tours. *Les Nouvelles de l'archéologie*, 115, 30-35. DOI : 10.4000/nda.666.

BLUME H. (1991) – *Das Relief der Erde : ein Bildatlas*. Enke, Stuttgart, 140 p. ISBN : 978-3-432-99241-9.

BOILEAU (1899) – Le gazonnement des ouvrages de fortification. *Revue du génie militaire*, 18, 647-649.

BOISDEFFRE M. D. (2005) – Archives privées, archives publiques : deux domaines si distincts ? In : CHASSAT S., FORLIVESI L., POTTIER G.-F. (éd.), *Éduquer et punir*. Presses universitaires de Rennes, Rennes, 245-248. ISBN : 978-2-7535-2347-0.

BOLLOT N. (2014) – *Les mouvements de terrain du vignoble champenois : approche géomorphologique et hydrologique*. Université de Reims Champagne-Ardenne, Reims, 325 p.

BOLLOT N., BENOIT A., BERTHE J., COMBAZ D., KRAUFFEL T., DEVOS A., LEJEUNE O., ANCELIN P.-Y. (2025) – Analysis of the Evolution of Lowland Landslides in Temperate Environments According to Climatic Conditions Based on LiDAR Data: A Case Study from Rilly (Champagne Vineyard Region, Northeastern France). *Geosciences*, 15 (6), 191. DOI : 10.3390/geosciences15060191.

BONDESAN A., EHLEN J. (2022) – Military Geoscience: A Multifaceted Discipline. In : BONDESAN A., EHLEN J. (éd.), *Military Geoscience: A Multifaceted Approach to the Study of Warfare*. Springer International Publishing, Cham, 1-15. ISBN : 978-3-030-79259-6.

BONIFACE X. (2012) – La réforme de l'armée française après 1871. *Inflexions*, 21 (3), 41-50. DOI : 10.3917/infle.021.0041.

BOQUET Y. (2018) – *Géographes et géographies : de la connaissance de la terre à la compréhension des territoires*. Éditions Universitaires de Dijon, Dijon, Collection U21. 444 p. ISBN : 978-2-36441-283-5.

BORDES F. (1954) – *Les limons quaternaires du bassin de la Seine : stratigraphie et archéologie paléolithique*. Masson, Paris, 472 p.

BOUCARD R. (1936) – *Les Secrets du G.Q.G.*. Les Éditions de France, Paris, 226 p.

BOUCHARD C., GUIEU J.-M. (2019) – Pacifisme et mouvements pour la paix (XIXe-XXe siècles). *Questions internationales*, 99-100 (4), 21-28. DOI : 10.3917/quin.099.0021.

BOUDON J.-O. (2013) – *Napoléon et la campagne de France : 1814*. Armand Colin, Paris, 368 p. ISBN : 978-2-200-28740-5.

BOULANGER P. (2001) – Le paysage de guerre dans le canton de Lassigny (Oise). *Ruralia*, 08, 26 p.

BOULANGER P. (2002) – *La géographie militaire française (1871-1939)*. Economica, collection Bibliothèque stratégique, Paris, 620 p.

BOULANGER P. (2006) – *Géographie militaire*. Ellipses, Paris, Carrefours. 384 p. ISBN : 978-2-7298-2810-3.

BOULANGER P. (2018) – Le terrain et la géotactique en géographie militaire. *Stratégique*, 119 (2), 77-94. DOI : 10.3917/strat.119.0077.

BOULANGER P. (2019) – Penser la géologie dans la géographie militaire française (1871-1914). *Revue de géographie historique*, 14-15. DOI : 10.4000/geohist.478.

BOUR B. (1999) – Ma « Feste Kaiser Wilhem II » à Mutzig. In : ASSOCIATION VAUBAN (éd.), *Actes du colloque Séré de Rivières d'Épinal du 14-15-16 septembre 1995*. Association Vauban, Paris, 263-287.

BOURNÉRIAS M., ARNAL G., BOCK C. (2001) – *Guide des groupements végétaux de la région parisienne : Bassin parisien, Nord de la France écologie et phytogéographie*. Belin, Paris, Collection Botanique. 640 p. ISBN : 978-2-7011-2522-0.

BOURNÉRIAS M., TIMBAL J. (1979) – Le hêtre et le problème du climax en champagne crayeuse. *Biologie et forêt*, 31, 209-223.

BOURQUIN L. (1994) – *Noblesse seconde et pouvoir en Champagne aux XVIe et XVIIe siècles*. Éditions de la Sorbonne, Paris, 333 p.

BOUXIN M. (2014) – *Le fort de la Pompelle et le corps expéditionnaire russe*. Koutkovo pole, Moscou, 173 p.

BRÉGUET L. (1999) – Le système défensif de Strasbourg, 1870-1914. In : ASSOCIATION VAUBAN (éd.), *Actes du colloque Séré de Rivières d'Épinal du 14-15-16 septembre 1995*. Association Vauban, Paris, 189-201.

BRÉNOT J., SAULIÈRE N., LÉTY C., TABORELLI P., ZÉLIE B., BLONDEAU R., DEVOS A., DESFOSSÉS Y. (2017) – How much did the soldiers dig? A quantification of WW1 remains in Argonne, France. *Geoarchaeology*, 32 (5), 534-548. DOI : 10.1002/gea.21623.

BROLLI A. (1999) – Les conditions humaines de la réalisation du système Séré de Rivières de 1874 à 1880, les chantiers et leurs contentieux, l'exemple de Belfort. In : ASSOCIATION VAUBAN (éd.), *Actes du colloque Séré de Rivières d'Épinal du 14-15-16 septembre 1995*. Association Vauban, Paris, 143-161.

BUCHSENSCHUTZ O., HAMON C., JACCOTTEY L. (2017) – Étude des meules en Champagne-Ardenne. In : BUCHSENSCHUTZ O., LEPAREUX-COUTURIER S. et FRONTEAU G. (éd.), *Les meules du Néolithique à l'époque médiévale : technique, culture, diffusion*. ARTEHIS Éditions, Dijon, 19-34. ISBN : 978-2-915544-78-7.

BUFFETAUT Y. (2016) – La reconquête du fort de la Pompelle - 23-30 septembre 1914. *Tranchées, Un regard nouveau sur la Grande Guerre*, 27, 23-38.

BURIDANT J. (2003) – La forêt mutilée - la reconstitution forestière dans l'Aisne après la Grande Guerre. *Graines d'Histoire - La mémoire de l'Aisne*, 17, 13-24.

BURSAUX D. (2019) – De la carte de Cassini à la Géoplateforme de l'État. *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, 94 (2), 4-5. DOI : 10.3917/re1.094.0004.

BURTSCHER P., HOFF F. (2009) – *Les fortifications d'Alsace-Lorraine, 1870-1918*. Histoire et collections, Paris, 200 p. ISBN : 978-2-35250-142-8.

CAGNAT R. (1918) – Notice sur la vie et les travaux de M. le Marquis de Vogüé. *Comptes rendus des séances de l'Académie des Inscriptions et Belles-Lettres*, 62 (6), 442-473.

CALVIN K., DASGUPTA D., KRINNER G., MUKHERJI A., THORNE P. W., TRISOS C., ROMERO J., ALDUNCE P., BARRETT K., BLANCO G., CHEUNG W. W. L., CONNORS S., DENTON F., DIONGUE-NIANG A., DODMAN D., GARSCHAGEN M., GEDEN O., HAYWARD B., JONES C., JOTZO F., KRUG T., LASCO R., LEE Y.-Y., MASSON-DELMOTTE V., MEINSHAUSEN M., MINTENBECK K., MOKSSIT A., OTTO F. E. L., PATHAK M., PIRANI A., POLOCZANSKA E., PÖRTNER H.-O., REVI A., ROBERTS D. C., ROY J., RUANE A. C., SKEA J., SHUKLA P. R., SLADE R., SLANGEN A., SOKONA Y., SÖRENSSON A. A., TIGNOR

M., VAN VUUREN D., WEI Y.-M., WINKLER H., ZHAI P., ZOMMERS Z., HOURCADE J.-C., JOHNSON F. X., PACHAURI S., SIMPSON N. P., SINGH C., THOMAS A., TOTIN E., ALEGRÍA A., ARMOUR K., BEDNAR-FRIEDL B., BLOK K., CISSÉ G., DENTENER F., ERIKSEN S., FISCHER E., GARNER G., GUIVARCH C., HAASNOOT M., HANSEN G., HAUSER M., HAWKINS E., HERMANS T., KOPP R., LEPRINCE-RINGUET N., LEWIS J., LEY D., LUDDEN C., NIAMIR L., NICHOLLS Z., SOME S., SZOPA S., TREWIN B., VAN DER WIJST K.-I., WINTER G., WITTING M., BIRT A., HA M. (2023) – *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (éd.)]. IPCC,* Genève, 184 p.

CAMPOBASSO C., CARTON A., CHELLI A., D'OREFICE M., DRAMIS F., GRACIOTTI R., GUIDA D., PAMBIANCHI G., PEDUTO F., PELLEGRINI L. (2021) – *Aggiornamento ed integrazioni delle linee guida della Carta geomorfologica d'Italia alla scala 1:50 000 e banca dati geomorfologica. Carta geomorfologica d'Italia 1:50 000*. Linee guida, ISPRA - Servizio Geologico d'Italia, Roma, 151 p.

CANCÈS B., JAUNAT J., PONTHIEU M., MARIN B., ROBIN V., BAUDA P. (2024) – L'impact environnemental des activités militaires dans le camp de Bitche. In : HEIN F. (dir.), *Le Pays de Bitche, un territoire en mutation*. Presses universitaires du Bitcherland, Bitche, 111-115. URL : https://hal.science/hal-04500258v1

CANDAU J. (2023) – Slow science : l'appel de 2010 douze ans après. *Socio*, 17, 37-46. DOI : 10.4000/socio.14142.

CAO F. (2020) – *Approche interdisciplinaire pour la caractérisation hydrogéologique du milieu crayeux : application au transfert de perchlorate dans la craie de Champagne*. Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, Reims, 350 p.

CAPET C. (1995) – *La ceinture fortifiée de Reims : son rôle, son sacrifice, les conséquences (1874-1914) et son devenir*. Mémoire de DEA, Université de Reims Champagne-Ardenne, Reims, 85 p.

CARPENTIER V. (2023) – L'archéologie du monde contemporain (1800 à nos jours). In : GARCIA D., BOUIRON M. (dir.), *Atlas archéologique de la France*. Tallandier, Paris, 288-315. ISBN : 979-10-210-5938-2.

CASSINI DE THURY C. F. (1754) – *Avertissement ou introduction à la carte générale et particulière de la France*. BNF-Gallica, NUMM-68015, 33 p.

CHABLAT-BEYLOT A. (2010) – De la photographie aérienne au dossier d'objectif. *Revue historique des armées*, 261, 72-78.

CHALLIS K., FORLIN P., KINCEY M. (2011) – A Generic Toolkit for the Visualization of Archaeological Features on Airborne LiDAR Elevation Data. *Archaeological Prospection*, 18, 279-289.

CHASE A. S. Z., CHASE D. Z., CHASE A. F. (2017) – LiDAR for Archaeological Research and the Study of Historical Landscapes. In : MASINI N., SOLDOVIERI F. (éd.), *Sensing the Past*. Springer International Publishing, Cham, 89-100. ISBN : 978-3-319-50516-9.

CHAURIS L. (2009) – Pour une géo-archéologie du Patrimoine : Pierres, carrières et constructions en Bretagne. *Revue archéologique de l'Ouest*, 26, 259-283. DOI : 10.4000/rao.925.

CHEVALIER Y. (1972) – Métamorphoses de la Champagne crayeuse : déboisement et équilibre biologique. *Revue Forestière Française*, 4, 303. DOI : 10.4267/2042/20624.

CHEVALLIER R. (1964) – Colloque international d'archéologie aérienne. *Annales. Histoire, Sciences Sociales*, 19 (4), 750-754. DOI : 10.3406/ahess.1964.421208.

CHEVIGNY E., SALIGNY L., GRANJON L., GOGUEY D., CORDIER A., PAUTRAT Y., GIOSA A. (2018) – Identifier et enregistrer des vestiges archéologiques sous couvert forestier à partir de données LiDAR : méthode et limites. *ArcheoSciences*, 42 (2), 31-43. DOI : 10.4000/archeosciences.5727.

CHIBA D., SAWICKI M., NISHITANI Y., NAKATANI Y., MATSUKURA F., OHNO H. (2008) – Magnetization vector manipulation by electric fields. *Nature*, 455 (7212), 515-518. DOI : 10.1038/nature07318.

CHIFFRE E., SAUVAGE J.-C. (2016) – La géographie au service de la défense du territoire : le cas du projet de réduit du Morvan (1872-1899). *Revue de géographie historique*, 8, 17 p. DOI : 10.4000/geohist.5371.

CHOUQUER G. (2008) – *Traité d'archéogéographie : la crise des récits géohistoriques*. Éd. Errance, Paris, 199 p. ISBN : 978-2-87772-374-9.

COJAN I., BRULHET J., CORBONNOIS J., DEVOS A., GARGANI J., HARMAND D., JAILLET S., JOUVE A., LAURAIN M., LEJEUNE O., LE ROUX J., LOSSON B., MARRE A., MOREAU M.-G., RICORDEL C., SIMON-COINÇON R., STAB O., THIRY M., VOINCHET P. (2007) – Morphologic evolution of eastern Paris Basin: « ancient surfaces » and Quaternary incisions. *Mémoires de la Société Géologique de France*, 178, 135-155.

COMBAUD A., DEVOS A., CHALUMEAU L., TABORELLI P., BOLLOT N. (2016) – Les plans directeurs de la Grande Guerre : une nécessaire innovation cartographique. DAVOINE P.-A. et ELISE B. (éd.), *Revue Internationale de Géomatique*, 26 (3), 363-393. DOI : 10.3166/rig.2016.00004.

COMITÉ DES FORTIFICATIONS (1843) – 221 : *Projet de fortification de Reims*. Comité des fortifications, Paris, 18 p.

CONSEIL GÉNÉRAL DE L'ISÈRE (1876) – *Rapports et délibérations*. Conseil Général de l'Isère, Grenoble, 935 p. URL : https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k5626695d/f321.image.r=%22fort%20de%20Bron%22

COQUE R. (2002) – *Géomorphologie 6 éd.* Armand Colin, Paris, Collection U. 502 p. ISBN : 978-2-200-26373-7.

COQUET H. (1999) – La fortification Séré de Rivières de montagne. In : ASSOCIATION VAUBAN (éd.), *Actes du colloque Séré de Rivières d'Épinal du 14-15-16 septembre 1995*. Association Vauban, Paris, 321-325.

COSTA L., LAÜT L., PETIT C. (2020) – Archéologie, forêt et Lidar : une recherche qui a du relief ! Introduction. *Archéologies numériques*, 4 (1). DOI : 10.21494/ISTE.OP.2020.0536.

COTTET M. (2019) – Notion en débat : paysage. *Géoconfluences*. URL : https://geoconfluences.ens-lyon.fr/informations-scientifiques/a-la-une/notion-a-la-une/paysage

COUTANT C., SCHMIDT F., QUANTINET D. (2016) – *Du côté du Mont de Berru. Aux origines de la Coopérative Vinicole de Nogent-l'Abbesse et Cernay-lès-Reims*. Éditions de l'Effervescence, Reims, Epernay, 96 p.

COUTANT C., SCHMIDT F., QUANTINET D. (2024) – *Sorti de l'oubli*. Éditions de l'Effervescence, Reims, Epernay, 92 p.

COUTANT C., TOURTEBATTE P., SCHMIDT F., QUANTINET D. (2017) – *Le fort de Nogent-l'Abbesse. Quand la coopérative vinicole de Nogent l'Abbesse et Cernay-lès-Reims adopte un fort Séré de Rivières*. Éditions de l'Effervescence, Reims, Epernay, 96 p.

COWLEY D. C., STICHELBAUT B. B. (2012) – Historic Aerial Photographic Archives for European Archaeology. *European Journal of Archaeology*, 15 (2), 217-236. DOI : 10.1179/1461957112Y.0000000010.

CREPIF (1994) – *Fortifications et patrimoine militaire en Île-de-France : mémoire, obsolescence, conservation, réutilisation ?* CREPIF, Paris, Cahiers du CREPIF, 48, 160 p.

CROS B. (1999) – La défense des côtes à l'époque de Séré de Rivières. In : ASSOCIATION VAUBAN (éd.), *Actes du colloque Séré de Rivières d'Épinal du 14-15-16 septembre 1995*. Association Vauban, Paris, 326-336.

CROZET A., LAPLAIGE C., RODIER X. (2017) – Une approche multidisciplinaire de la fabrique des paysages dans la longue durée dans les forêts de Blois, Russy, Boulogne et Chambord (Loir-et-Cher). *Projets de paysage*, 16, 23. DOI : 10.4000/paysage.5487.

CRUTCHLEY S. P., CROW P. (2010) – *The Light Fantastic: Using Airborne Laser Scanning in Archaeological Survey*. English Heritage, Swindon, 17-27 p.

CUGR (2017) – *Schéma Régional de Cohérence Écologique du Grand Reims*. CUGR, Reims, 80 p.

DANDURAND G., DEVOS A., HUSSON E., BERTHE J., BOLLOT N., FRONTEAU G., LEJEUNE O., LOSSON B. (2022) – Karsts des bassins sédimentaires : comparaison entre les Bassins parisien et aquitain. *Karstologia*, 79 (1), 1-10. DOI : 10.3406/karst.2022.3305.

DARDIGNAC C., DAVID S. (2015) – L'apport de l'archéologie et du LIDAR dans la découverte du camp retranché de Paris. In : AUDUC A. (dir.), *Le camp retranché de Paris*. Somogy, Paris, 83-97. ISBN : 978-2-7572-0967-7.

DAVID S. (2023) – *Habitats, réseaux viaires et parcellaires du massif forestier de Fontainebleau de l'Antiquité au XVIIIe siècle : analyses archéologiques et archéo-géographiques*. Thèse de doctorat, Université de Paris I, Paris, 354 p.

DE JOMINI A. H. (1838) – *Précis de l'art de la guerre, ou Nouveau tableau analytique des principales combinaisons de la stratégie, de la grande tactique et de la politique militaire*. Anselin, Paris, 385 p.

DE LESPINOIS J. (2013) – Les transformations de la guerre aérienne. *Stratégique*, 102 (1), 347-367. DOI : 10.3917/strat.102.0347.

DE MARTONNE E. (1924) – La photographie d'avion au service de la géographie en Suisse et aux États-Unis. *Annales de géographie*, 33 (185), 484-488.

DE MATOS-MACHADO R. (2018) – *Paysages de guerre et Lidar : de la caractérisation des polémoformes à la conservation des patrimoines naturel et culturel de la forêt domaniale de Verdun (Meuse, France)*. Université de Paris La Sorbonne, Paris, 520 p. URL : http://www.theses.fr/s179287

DE MATOS-MACHADO R., AMAT J.-P., ARNAUD-FASSETTA G., BÉTARD F. (2016) – Potentialités de l'outil LiDAR pour cartographier les vestiges de la Grande Guerre en milieu intra-forestier (bois des Caures, forêt domaniale de Verdun, Meuse). *EchoGéo*, 38. DOI : 10.4000/echogeo.14791.

DE MATOS-MACHADO R., TOUMAZET J.-P., BERGÈS J.-C., AMAT J.-P., ARNAUD-FASSETTA G., BÉTARD F., BILODEAU C., HUPY J. P., JACQUEMOT S. (2019) – War landform mapping and classification on the Verdun battlefield (France) using airborne LiDAR and multivariate analysis: War landform mapping and classification on the Verdun battlefield. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44, 1430-1448. DOI : 10.1002/esp.4586.

DE MONTALEMBERT M.-R. (1776) – *La fortification perpendiculaire, ou Essai sur plusieurs manières de fortifier la ligne droite, le triangle, le quarré, & tous les polygônes, de quelqu'étendue qu'en soient les côtés, en donnant à leur défense une direction perpendiculaire (Tome 1)*. P. D. Pierres, Paris, 225 p.

DEBS L., CERCY C. (2020) – D132523 : *Hauts-de-France, Premesques, Batterie de Sénarmont*. Rapport final d'opération, Inrap, Glisy, 92 p.

DECKER M. (1999) – L'évolution de l'artillerie de 1871 à 1914. In : ASSOCIATION VAUBAN (éd.), *Actes du colloque Séré de Rivières d'Épinal du 14-15-16 septembre 1995*. Association Vauban, Paris, 85-94.

DECOQ G., DE FOUCAULT B., AMAT J.-P. (1996) – Flore et végétation impliquées dans la recolonisation de l'ancien fort de Mayot (Aisne, France). In : DÉSIRÉ E.-P., REGRAIN R. (dir.), *Sociétés humaines et milieux humides en Picardie*. CTHS. Amiens, 171-182.

DEFFONTAINES P., DELAMARRE J.-B. (1958) – *Atlas aérien, France, Tome III*. Gallimard, Paris, 192 p.

DELAUNAY J. (1980) – Aperçu sur l'histoire militaire de Reims. *Mélanges d'histoire militaire*, 159, 5-22.

DEMAILLY-MENEUR M. (1991) – *Le massif de Saint-Thierry : structure et évolution d'un paysage médiéval*. Association viticole du massif de Saint-Thierry, Saint-Thierry, 223 p. ISBN : 978-2-9501583-3-8.

DEMANGEON A. (1946) – *La France. France économique et humaine, vol. 1*. Armand Colin, Paris, 459 p.

DENARD H. (2012) – The London Charter for the Computer-based Visualisation of Cultural Heritage. In : BENTKOWSKA-KAFEL A., DENARD H., BAKER D. (éd.), *Paradata and Transparency in Virtual Heritage*. Routledge, Abingdon, 73-78. ISBN : 978-1-317-08425-9.

DÉPRET J. (2004) – *Maubeuge la militaire : Genèse et évolution de la place forte 1872-1914*. Édition Dépret, Roclincourt, 195 p.

DÉPRET J. (2008) – *Lille et ses forts, une forteresse méconnue de la IIIe République*. Édition Dépret, Roclincourt, 32 p.

DÉPRET J. (2016) – *Monographie des forts de Maubeuge - (1874-1914)*. Édition Dépret, Roclincourt, 112 p.

DÉPRET J., DIEST P. (2021) – *La chute de Lille en 1914. Abandons militaires et politiques d'une place forte*. Édition Dépret, Roclincourt, 240 p. ISBN : 2-9520574-7-8.

DEROUIN J.-P. (2018) – Un système de télédétection : le Lidar. In : BERGERAT F. (éd.), *14-18, La Terre et le Feu. Géologie et géologues sur le front occidental*. Coédition AGBP-COFRHIGÉO-SGN, Mém. hors-série n°10 de l'AGBP, 400.

DESFOSSÉS Y., JACQUES A., PRILAUX G. (2016) – *Archéologie de la Grande Guerre*. La Découverte, Paris, 336 p. ISBN : 978-2-7373-7168-4.

DEVEREUX B. J., AMABLE G. S., CROW P. (2008) – Visualisation of LiDAR terrain models for archaeological feature detection. *Antiquity*, 82 (316), 470-479. DOI : 10.1017/S0003598X00096952.

DEVEREUX B. J., AMABLE G. S., CROW P., CLIFF A. D. (2005) – The potential of airborne lidar for detection of archaeological features under woodland canopies. *Antiquity*, 79 (305), 648-660.

DEVÈZE M. (1966) – Les forêts françaises à la veille de la Révolution. *Revue d'histoire moderne et contemporaine*, 13 (4), 241-272. DOI : 10.3406/rhmc.1966.2921.

DEVOS A. (1996) – *Hydrologie et aménagements hydrauliques de la Saulx et de l'Ornain (Lorraine)*. Thèse de doctorat, Université de Metz, Metz, 461 p.

DEVOS A. (2010) – *Les conditions d'écoulement des plateaux calcaires de l'Est de la France*. Habilitation à diriger la recherche, Université de Reims Champagne-Ardenne, Reims, 163 p.

DEVOS A. (éd.) (2019) – *IMPACT 14-18 Actes du colloque international de Reims (20-21 septembre 2018)*. Université de Reims, Reims, 168 p.

DEVOS A., LARATTE S., BOLLOT N., FRONTEAU G. (2019a) – « Creutes » et réseaux de défenses dans les paysages de guerre, exemple du Mont-Chatte (Hermonville, France). *Revue de géographie historique*, 14-15. DOI : 10.4000/geohist.646.

DEVOS A., LARATTE S., TABORELLI P., LESJEAN F. (2019b) – Un exemple de structure cellulaire de défense : la Butte de Brimont, apport des plans directeurs et du Lidar (France). *Revue de géographie historique*, 14-15. DOI : 10.4000/geohist.660.

DEVOS A., LARATTE S., TABORELLI P., ORTONOVI S., FRONTEAU G., RABASTÉ Y., DUCHÊNE B. (2021) – Approche géotechnique du remplissage des « polémoformes » de la Grande Guerre. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 27 (4), 279-292. DOI : 10.4000/geomorphologie.16212.

DEVOS A., PICHARD C., FRONTEAU G., LARATTE S. (2022) – Géographie et hydrologie de la ville de Reims/Durocortorum et de ses environs. *Gallia*, 79 (1), 39-45. DOI : 10.4000/gallia.6549.

DEVOS A., SOSSON C., FRONTEAU G., LEJEUNE O. (2009) – Les tufières du Vormy et des Fontinettes (Aisne-Marne, France) : marqueurs de la faible karstification des calcaires lutétiens de l'Est du Bassin parisien ? *Karstologia*, 54 (1), 37-48. DOI : 10.3406/karst.2009.2658.

DEVOS A., TABORELLI P., DODICI M., CHALUMEAU L., BURIDANT J., BOLLOT N., COMBAUD A., DESFOSSÉS Y. (2015) – Rôle des conditions géographiques sur l'organisation spatiale des réseaux de défense de la Grande Guerre. Application à la Champagne (région de Reims). *Physio-Géo*, 9 (1), 157-174. DOI : 10.4000/physio-geo.4615.

DEVOS J.-C., NICOT J., SCHILLINGER P., WAKSMAN P., FICAT J. (1974) – *Inventaire sommaire des archives de la guerre, série N, 1872-1919*. Inventaire d'archives, Service Historique de l'Armée, Paris, 594 p.

DIEST P. (2013) – La prise de conscience de la valeur patrimoniale des bâtiments militaires de la place de Lille depuis 1880. *Revue du Nord*, 399 (1), 165. DOI : 10.3917/rdn.399.0165.

DIEST P. (2022) – Un patrimoine militaire en série aux devenirs multiples. L'exemple des forts « Séré de Rivières » construits entre 1874 et 1885. In : BARBE N., BAUER C., BELLAT F., BERGER J., BIANCO D. (dir.), *Architectures en série et patrimoine*. Maison des sciences de l'homme. Paris, 183-197.

DIEST P. (2023) – Préparer l'impossible défense de la frontière du Nord (1871-1914): *Revue Historique des Armées*, 310 (3), 41-54. DOI : 10.3917/rha.310.0041.

DIGEON C. (1959) – *La crise allemande de la pensée française (1870-1914)*. Presses universitaires de France, Paris, 568 p.

DION R. (1961) – Le « bon » et « beau » pays nommé champagne pouilleuse. *L'information géographique*, 25 (5), 209-214. DOI : 10.3406/ingeo.1961.2099.

DIRECTION DU PATRIMOINE (1995) – *Quel avenir pour le patrimoine fortifié ?* Direction du patrimoine, Paris, 169 p.

DISPAN DE FLORAN L., MERGEY M., GALAN M., VITTE I., JOUANILLOU A., LE BARH M., GUINARD E., LESBARRÈRES D., HELDER R. (2025) – Variability in the impact of linear transportation infrastructures on gene flow in French wild ungulate populations. *Landscape Ecology*, 40 (2), 31. DOI : 10.1007/s10980-025-02052-w.

DODICI M. (2015) – *Organisation spatiale des réseaux de défense de la Grande Guerre en Champagne-Ardenne – Application à la Région de Reims*. Mémoire de Master 2, Université de Reims Champagne-Ardenne, 72 p.

DOREL G., DUMÉNIL C. (1983) – L'évolution de l'agriculture en Champagne-Ardenne (pendant les trente dernières années). *Travaux de l'Institut Géographique de Reims*, 55 (1), 87-113. DOI : 10.3406/tigr.1983.1130.

DOUGHERTY C. (2015) – Vitesse et efficacité dans la conception des premières locomotives à vapeur. *Revue d'histoire des chemins de fer*, 46-47, 13-23. DOI : 10.4000/rhcf.2971.

DOUSSAUD A. (1879) – *Travaux publics. Les Entrepreneurs des forts construits de 1874-1878*. A. Langelier, Paris, 78 p.

DUCHEIN M. (1979) – Requiem pour trois lois défuntes. *La Gazette des archives*, 104 (1), 12-16. DOI : 10.3406/gazar.1979.2660.

DUMARCHE L. (1988) – La photographie aérienne 1914-1918 : une nouvelle arme de guerre. In : *14-18-Vues d'en haut, La photographie aérienne pendant la guerre de 1914-1918*. Musée de l'Armée, musée d'Histoire contemporaine, BDIC, Paris, 8-15.

DUMONT H., HELLIER E. (2010) – *Les nouvelles périphéries urbaines : formes, logiques et modèles de la ville contemporaine*. Presses universitaires de Rennes, Rennes, 218 p.

DUPOUEY J.-L., BACHACOU J., COSSERAT R., ABERDAM S., VALLAURI D., CHAPPART G., CORVISIER DE VILLÈLE M. A. (2007) – Vers la réalisation d'une carte géoréférencée des forêts anciennes de France. *Le Monde des Cartes*, 191, 85-98.

DUPRAT M. (1997) – Modèle tectono-sédimentaire des dépôts paléogènes dans le Nord-Est du Bassin de Paris : conséquences sur la géométrie du toit de la craie. *Bulletin d'Information des Géologues du Bassin de Paris*, 5 (2), 269-287.

DURAND-CLAYE L., DEBRAY P. (1890) – *Répertoire des carrières de pierre de taille exploitées en 1889 : recherches statistiques et expériences sur les matériaux de construction*. Librairie polytechnique Baudry et Cie, Paris, 352 p.

DURLET Isabelle (2024) – Évolution démographique liée à la construction des forts. In : COUTANT C., SCHMIDT F., QUANTINET D. (éds), *Sorti de l'oubli*. Éditions de l'Effervescence, Reims, Epernay, 42-45.

DURLET Jean-Michel (2024) – Histoire géologique de Nogent-l'Abbesse. In : COUTANT C., SCHMIDT F., QUANTINET D. (éds), *Sorti de l'oubli*. Éditions de l'Effervescence, Reims, Epernay, 21-24.

DURUP DE BALEINE A. (1998) – Paysages hérités de la fortification « Séré de Rivières » au sein des Côtes lorraines. *Revue Géographique de l'Est*, 38 (1), 57-84. DOI : 10.3406/rgest.1998.2483.

DURUP DE BALEINE A. (2001) – L'ouvrage fortifié de Froideterre : de l'outil de défense au paysage de mémoire. DUPRE J.-P. G. (éd.), *Revue Historique des Armées*, hors-série, 50-60.

DUTAILLY H. (1999) – Langres, place de manœuvre (1872-1914). In : ASSOCIATION VAUBAN (éd.), *Actes du colloque Séré de Rivières d'Épinal du 14-15-16 septembre 1995*. Association Vauban, Paris, 175-187.

ÉCOLE SUPÉRIEURE TECHNIQUE DU GÉNIE (1972) – *Cours de fortification. Chapitre IV : Avènement de l'explosif brisant*. Polycopié d'enseignement interne, École supérieure technique du génie, Angers.

EDGEWORTH M., GIBBARD P., WALKER M., MERRITTS D., FINNEY S., MASLIN M. (2023) – The stratigraphic basis of the Anthropocene Event. *Quaternary Science Advances*, 11, 11. DOI : 10.1016/j.qsa.2023.100088.

ELAGOUNI K., GARCIA C., MAMALET F., SEBILLOT P. (2012) – Combining Multi-scale Character Recognition and Linguistic Knowledge for Natural Scene Text OCR. In : *2012 10th IAPR International Workshop on Document Analysis Systems*. IEEE, Gold Coast, 120-124. ISBN : 978-0-7695-4661-2.

ENGERAND F. (1918) – *Le secret de la frontière, 1815-1871-1914 Charleroi*. Bossard, Paris, 600 p.

ÉVANNO Y.-M., VINCENT J. (2019) – *Tourisme et Grande guerre : voyage(s) sur un front historique méconnu, 1914-2019*. Éditions Codex, Ploemeur, 450 p. ISBN : 978-2-918783-14-5.

FAREED N., SILVA C. A., NUMATA I., FLORES J. P. (2026) – Interdisciplinary Applications of LiDAR in Forest Studies: Advances in Sensors, Methods, and Cross-Domain Metrics. *Remote Sensing*, 18 (2), 219. DOI : 10.3390/rs18020219.

FAVRE C., GREL A., GRANIER E., COSSERAT-MANGEOT R., BACHACOU J., LEROY N., DUPOUEY J.-L. (2017) – *Digitalisation des cartes anciennes. Manuel pour la vectorisation de l'usage des sols et le géoréférencement des minutes 1:40 000 de la carte d'Etat-Major*. Manuel, INRA, 79 p.

FÉQUANT G. (1986) – *Le Ciel des bergers*. La Manufacture, Paris, 223 p.

FERNANDEZ-DIAZ J., CARTER W., SHRESTHA R., GLENNIE C. (2014) – Now You See It… Now You Don't: Understanding Airborne Mapping LiDAR Collection and Data Product Generation for Archaeological Research in Mesoamerica. *Remote Sensing*, 6 (10), 9951-10001. DOI : 10.3390/rs6109951.

FERVEL C. (1870) – Etudes de géographie stratégique sur le Nord-Ouest de l'Europe. *Le Spectateur militaire*, 21, 312-332 et 5-27.

FERVEL C. (1873) – *Etudes stratégiques sur le théâtre de guerre entre Paris et Berlin*. Dumaine, Paris, 156 p.

FISCHESSER B., LAMBERT H. (1977) – *Le paysage de montagne. Vol. 1 Présentation, l'étude paysagère, l'analyse des perceptions*. CEMAGREF, Grenoble, 134 p.

FLORINSKY I. V. (1998) – Combined analysis of digital terrain models and remotely sensed data in landscape investigations. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 22 (1), 33-60. DOI : 10.1177/030913339802200102.

FLUCHER G. (2011) – *La Fère, Aisne, Etang Saint-Firmin L'ouvrage à cornes du faubourg Saint-Firmin*. Rapport final d'opération, GA19161901, Inrap, Amiens, 24 p.

FLUCHER G. (2017) – *La Fère (Aisne) Angle de la rue des Bigors et de la rue Mazin Fortifications urbaines*. Rapport final d'opération, D116961, Inrap, Glisy, 58 p.

FORCADE O., DUHAMEL É. et VIAL P. (éd.) (1999) – *Militaires en République, 1870-1962 : Les officiers, le pouvoir et la vie publique en France*. Éditions de la Sorbonne, Paris, Histoire de la France aux XIXe et XXe siècles. 734 p. ISBN : 978-2-85944-362-7.

FORD J., KESSLER H., COOPER A. H., PRICE S. J., HUMPAGE A. J. (2010) – *An Enhanced Classification for Artificial Ground*. Rapport d'étude, OR/10/036, BGS, Londres, 32 p.

FOUQUERAY B. (2003) – *Le système fortifié Séré de Rivières 1874-1914 à Reims*. Autoédition, Trigny, 609 p.

FRANCHOMME M. (2008) – *Du cadastre napoléonien à la trame verte, le devenir des petites zones humides périurbaines en région Nord-Pas-de-Calais*. Thèse de doctorat, Lille 1, Lille, 437 p.

FRINJS M., MALCHAIR L., MOULINS J.-J., PUELINCKX J. (2008) – *Index de la fortification française 1874-1914*. Autoédition, Liège, 832 p.

FRONTEAU G. (2000) – *Comportements télogénétiques des principaux calcaires de Champagne-Ardenne : en relation avec leur facies de dépôt et leur sequençage diagénétique*. Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, Reims, 296 p.

FRONTEAU G., LARATTE S., DEVOS A., PICHARD C. (2022) – L'emploi antique des géomatériaux à Reims/Durocortorum. *Gallia*, 79 (1), 47-59. DOI : 10.4000/gallia.6583.

FRONTEAU G., LELARGE N. (2022) – Pierres et carrières des abords de la Meuse ardennaise et lorraine, variétés des matériaux et principaux gisements de pierres de taille. In : PIAVAUX M., BLANJEAN D., DELEAU V., UNIVERSITÉ DE NAMUR, MAISON DE LA CULTURE (DINANT, BELGIUM) (éd.), *Pierre à Pierre II : Économie de la pierre dans la vallée de la Meuse et dans les*

régions limitrophes (Ier siècle avant J.-C.-XVIIIe siècle). Service public de Wallonie, Territoire, logement, patrimoine, énergie, AWaP, Namur, 47-61. ISBN : 978-2-39038-149-5.

FRONTEAU G., MOREAU C., THOMACHOT-SCHNEIDER C., BARBIN V. (2010) – Variability of some Lutetian building stones from the Paris Basin, from characterisation to conservation. *Engineering Geology*, 115 (3-4), 158-166. DOI : 10.1016/j.enggeo.2009.08.001.

FRONTEAU G., PAICHELER J.-C., BERTHELOT F., ROLLET P., BALMELLE A., DECROCK B. (2008) – Évolution historique de l'approvisionnement en pierre des monuments rémois : comparaison entre les périodes gallo-romaine et médiévale. In : BLARY F., GÉLY J.-P., LORENZ J. (dir.), *Pierres du patrimoine européen. Economie de la pierre de l'antiquité à la fin des temps modernes*. CTHS, Paris, 267-274.

FRONTEAU G., TURMEL A., DECROCK B., LARATTE S., OLIVIER L., DEVOS A. (2019) – Approche pluri-disciplinaire des matériaux du bâti à Reims (Marne) : méthodologie d'étude des pierres et des sites carriers. In : GÉLY J.-P., BIWER S., LAFFITE J.-D., BRUN O. (dir.), *Pierre à pierre : économie de la pierre de l'Antiquité à l'époque moderne en Lorraine et régions limitrophes*. Presses universitaires de Lorraine, Nancy, 303-318. ISBN : 978-2-8143-0556-4.

FRONTEAU G., TURMEL A., PICHARD C., DECROCK B., DEVOS A., LEJEUNE O., MÉNIVAL D., CHALUMEAU L., COMBAUD A. (2014) – Les approvisionnements en pierre de construction à Reims : des choix marqués par de fortes contraintes géologiques, géographiques et socio-économiques. In : GÉLY J.-P., LORENZ G., LAFFITE J.-D. (dir.), *Construire la ville. Histoire urbaine de la pierre à bâtir*. CTHS, Paris, 221-236.

FRUCHART C. (2014) – *Analyse spatiale et temporelle des paysages de la forêt de Chailluz (Besançon, Doubs) de l'Antiquité à nos jours*. Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, Besançon, 347 p.

GABER S. (2003) – *Les forts de Toul : Histoire d'un camp retranché 1874-1914*. Éditions Serpenoise, Metz, 179 p.

GALGANO F. (2004) – Decisive Terrain: A Military Geography of Fortress West Point, 1775-1797. In : CALDWELL D. R., EHLEN J., HARMON R. S. (éd.), *Studies in military geography and geology*. Kluwer Academic Pub, Dordrecht ; Boston, 105-119. ISBN : 978-1-4020-3104-5.

GALLET-MORON E., BURIDANT J., CHALUMEAU L. (2019) – Dynamique de la végétation sur le site de la Cote 108 et dans la forêt domaniale de Sapigneul. *Revue de Géographie Historique*, 14-15. URL : http://rgh.univ-lorraine.fr/articles/view/117/

GANE C., SARSON T. (1979) – *Structured systems analysis: tools and techniques*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, Prentice-Hall software series, 241 p. ISBN : 978-0-13-854547-5.

GARNIER F. (2014) – *Fortification permanente Séré de Rivières : parapets et rempart (1870-1885)*. Autoédition, Cahier d'Albi, 56, 22 p.

GARNIER F. (2016a) – *Fortification permanente Séré de Rivières Travaux 17 Blindage en bois des puits et galeries*. Autoédition, Cahier d'Albi, 107, 35 p.

GARNIER F. (2016b) – *Fortification permanente Séré de Rivières, construction de la carrière au fort, 1874-1885*. Autoédition, Cahier d'Albi, 110, 84 p.

GARNIER F. (2021) – *Fortification permanente : bornage et zone de servitude II*. Autoédition, Cahier d'Albi, 216, 54 p.

GAUTIER M., GUIGON P., LEROUX G. (2019) – *Les moissons du Ciel. 30 années d'archéologie aérienne au-dessus du Massif armoricain*. Presses Universitaires de Rennes, Rennes, 432 p.

GAY V. (2021) – Mapping the Third Republic: A Geographic Information System of France (1870–1940). *Historical Methods: A Journal of Quantitative and Interdisciplinary History*, 54 (4), 189-207. DOI : 10.1080/01615440.2021.1937421.

GÉLY J.-P. (1996) – Le Lutétien du Bassin Parisien ; de l'analyse séquentielle haute-résolution à la reconstitution paléogéogaphique. *Bulletin d'Information des Géologues du Bassin de Paris*, 33 (4).

GÉLY J.-P. (2009) – LE LUTÉTIEN : une période charnière de l'histoire du Bassin parisien. *Saga Information*, 284, 6-24.

GÉLY J.-P. (2016) – Le Paléogène du Bassin de Paris : corrélations et reconstitutions paléogéographiques. *Bulletin d'Information des Géologues du Bassin de Paris*, 53 (4).

GÉLY J.-P. (2018) – De Noyon à Reims par le Chemin des Dames, à travers les formations tertiaires. In : BERGERAT F. (éd.), *14-18, La Terre et le Feu. Géologie et géologues sur le front occidental*. Coédition AGBP-COFRHIGÉO-SGN, Mém. hors-série n°10 de l'AGBP, 168-179.

PARRIAUX A., ARNOULD M. (2009) – *Géologie : bases pour l'ingénieur, 2e éd. revue et augmentée*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 517 p. ISBN : 978-2-88074-810-4.

GEORGES-LEROY M. (2013) – Lidar et histoire de l'occupation du sol en Lorraine. In : THIÉBAULT S., DEPAEPE P. (dir.), *L'archéologie au laboratoire*. La Découverte, Paris, 243-253. ISBN : 978-2-7071-7648-6.

GEORGES-LEROY M. (2022) – L'utilisation du lidar dans le Grand Est : état des lieux et enjeux. *Remuer Ciel et Terre. L'apport du LiDAR en archéologie*, 2022, Saint-Étienne-lès-Remiremont, Communication orale.

GEORGES-LEROY M., BOCK J., DAMBRINE E., DUPOUEY J.-L. (2009) – Le massif forestier, objet pertinent pour la recherche archéologique. L'exemple du massif forestier de Haye (Meurthe-et-Moselle). *Revue Géographique de l'Est*, 49 (2-3). DOI : 10.4000/rge.1931.

GEORGES-LEROY M., BOCK J., DAMBRINE É., DUPOUEY J.-L. (2011) – Apport du lidar à la connaissance de l'histoire de l'occupation du sol en forêt de Haye. *ArcheoSciences*, 35, 117-129. DOI : 10.4000/archeosciences.3015.

GHEYLE W., SAEY T., VAN HOLLEBEEKE Y., VERPLAETSE S., NOTE N., BOURGEOIS J., VAN MEIRVENNE M., VAN EETVELDE V., STICHELBAUT B. (2016a) – Historical Aerial Photography and Multi-receiver EMI Soil Sensing, Complementing Techniques for the Study of a Great War Conflict Landscape: Aerial photography and EMI soil sensing of a WWI conflict landscape. *Archaeological Prospection*, 23 (3), 149-164. DOI : 10.1002/arp.1534.

GHEYLE W., SAEY T., VAN HOLLEBEEKE Y., VERPLAETSE S., NOTE N., BOURGEOIS J., VAN MEIRVENNE M., VAN EETVELDE V., STICHELBAUT B. (2016b) – The Archaeology of World War I in Comines-Warneton (Belgium) through Aerial Photographs and Proximal Soil Sensing. In : STICHELBAUT B., COWLEY D. (éd.), *Conflict Landscapes and Archaeology from Above*. Routledge, Londres, 11-28. URL : http://doi.wiley.com/10.1002/arp.1534

GHEYLE W., STICHELBAUT B., SAEY T., NOTE N., VAN DEN BERGHE H., VAN EETVELDE V., VAN MEIRVENNE M., BOURGEOIS J. (2018) – Scratching the surface of war. Airborne laser scans of the Great War conflict landscape in Flanders (Belgium). *Applied Geography*, 90, 55-68. DOI : 10.1016/j.apgeog.2017.11.011.

GIBBARD P. L., WALKER M. J. C. (2013) – The term 'Anthropocene' in the context of formal geological classification. *Geological Society, London, Special Publications*, 395 (1), 29-37. DOI : 10.1144/SP395.1.

GOUDIE A. (1993) – Human influence in geomorphology. *Geomorphology*, 7, 37-59.

GOUDIE A., VILES H. A. (2016) – *Geomorphology in the Anthropocene*. Cambridge University Press, Cambridge, 324 p. ISBN : 978-1-107-13996-1.

GOVERNING BODY OF SUOMENLINNA (2024) – *Resilient Fortress: Suomenlinna Summer School Report. European project on fortified landscape facing new threats*. Rapport d'étude, Governing Body of Suomenlinna, Helsinki, 124 p.

GOYA M. (2019) – *L'invention de la guerre moderne : du pantalon rouge au char d'assaut, 1871-1918*. Tallandier, Paris, 480 p. ISBN : 979-10-210-4076-2.

GRAY J. M. (2013) – *Geodiversity: valuing and conserving abiotic nature Second edition*. Wiley Blackwell, Chichester, 495 p. ISBN : 978-0-470-74214-3.

GUÉRÉMY P., MARRE A. (1991) – Les mouvements de terrain dans le vignoble champenois. *La Champagne Viticole*, Numéro spécial Environnement et aménagement du vignoble, 8-16.

GUÉRÉMY P., VEJUX V. (1987) – Mouvements de terrain successifs : les glissements de terrain et les coulées du versant sud de la montagne d'Avize. *Travaux de l'Institut Géographique de Reims*, 69 (1), 113-127. DOI : 10.3406/tigr.1987.1213.

GUÉRIN H., LAVRAIN M., LAURENTIAUX (1970) – Itinéraire géologique : faciès continentaux de la Montagne de Reims. *Annales de l'Université et de l'ARERS*, 8, 85-98.

GUETTÉ A. (2018) – *Contribution à l'analyse multiscalaire de l'anthropisation et de la naturalité en géographie de la conservation*. Thèse de doctorat, Université de Nantes, Nantes, 245 p. URL : https://hal.science/tel-01846283v1

GUETTÉ A., CARRUTHERS-JONES J., CARVER S. J. (2021) – *Projet CARTNAT. Cartographie de la naturalité*. Notice technique, Comité français de l'UICN, Paris, 12 p.

GUILLOCHEAU F., ROBIN C., ALLEMAND P., BOURQUIN S., BRAULT N., DROMART G., FRIEDENBERG R., GARCIA J.-P., GAULIER J.-M., GAUMET F., GROSDOY B., HANOT F., LE STRAT P., METTRAUX M., NALPAS T., PRIJAC C., RIGOLLET C., SERRANO O., GRANDJEAN G. (2000) – Evolution tectonique méso-cénozoïque du bassin de Paris: contraintes stratigraphiques 3D. *Geodinamica Acta*, 13 (4), 189-245. DOI : 10.1016/S0985-3111(00)00118-2.

GUILLOT (1949) – La fortification permanente jusqu'à la Deuxième Guerre mondiale. *Cours de fortification*. École supérieure technique du Génie, Versailles, 257 p.

GUYOT A., HUBERT-MOY L., LORHO T. (2018) – Detecting Neolithic Burial Mounds from LiDAR-Derived Elevation Data Using a Multi-Scale Approach and Machine Learning Techniques. *Remote Sensing*, 10 (2), 225. DOI : 10.3390/rs10020225.

GUYOT A., LENNON M., HUBERT-MOY L. (2021) – Objective comparison of relief visualization techniques with deep CNN for archaeology. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 38, 103027. DOI : 10.1016/j.jasrep.2021.103027.

HARMAND D., OLLIVE V. (2015) – Photographies aériennes obliques, ordres de grandeur et paysages. In : HUSSON J.-P., DESHAIES M. (éd.), *Paysages lus du ciel*. Éditions de l'Université de Lorraine, Nancy, 145-156. ISBN : 978-2-38451-117-4.

HAUPT P. (2009) – Great War Aerial Photographs in German Archives: a Guide to the Sources. In : COWLEY D. C. (éd.), *Images of Conflict: Military Aerial Photography and Archaeology*. Cambridge Scholars Publishing, Newcastle-upon-Tyne, 151-164. ISBN : 978-1-4438-0314-4.

HEIMBURGER F. (2022) – Les publications scientifiques du Centenaire. In : WEINRICH A., PATIN N. (dir.), *Quel bilan scientifique pour le centenaire 1914-1918 ?*. Sorbonne Université presses, Paris, 179-196.

HENRI O. (2023) – *La nouvelle fortification (1800-1870) : de l'ère bastionnée à l'ère polygonale (France, Europe, États-Unis)*. Olizel, Saint-Barthélemy-d'Anjou, 399 p.

HERTSLET E. (1875) – *The map of Europe by treaty; showing the various political and territorial changes which have taken place since the general peace of 1814*. Autoédition, Butterworths, 856 p. URL : https://archive.org/details/mapofeuropebytre01hertuoft/page/n7/mode/2up

HESSE R. (2010) – LIDAR-derived Local Relief Models (LRM) - a new tool for archaeological prospection. *Archaeological Prospection*, 17, 67-72.

HESSE R. (2014) – Geomorphological traces of conflict in high-resolution elevation models. *Applied Geography*, 46, 11-20. DOI : 10.1016/j.apgeog.2013.10.004.

HOBLÉA F. (2024) – *Eaux, reliefs et paysages : gestion durable des ressources géopatrimoniales des montagnes karstiques. De la recherche à l'action*. Habilitation à diriger la recherche, Université Savoie Mont-Blanc, Chambéry, 447 p.

HOBLÉA F., CAYLA N., BERTHET J., BILLAUD Y., BIOT V., COUTTERAND S., DELANNOY J.-J., GASQUET D., GUYOMARD A., MOREAU L., PEYRACHE-GADEAU V., PERRET A., PRUD'HOMME F., RAVANEL L., RENAU P., ROCHAS J., SADIER B. (2014) – L'objet emblématique « géopatrimoines ». Évaluer, protéger, valoriser : affirmation d'un champ de recherche transversal et collaboratif. *Cahiers de géographie*, 16, 119-142.

HÖFLE B., RUTZINGER M. (2011) – Topographic airborne LiDAR in geomorphology: A technological perspective. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementary Issues*, 55 (2), 1-29. DOI : 10.1127/0372-8854/2011/0055S2-0043.

HOUDAILLE (1889) – Étude sur l'alimentation en eau des ouvrages de fortification. *Revue du génie militaire*, 3 (5-6), 430-457.

HUBÉ D. (2013) – *Potentialités d'un marquage des eaux souterraines par des substances pyrotechniques en relation avec les zones de combats de la première guerre mondiale. Le cas des perchlorates*. Rapport final, RP-62008-FR, BRGM, Orléans, 26 p.

HUBÉ D. (2024) – *(1914-1918) Première Guerre mondiale sur le front occidental. L'héritage environnemental d'une guerre et d'une sortie de guerre industrielles*. Thèse de doctorat, Université d'Orléans, Orléans, 1332 p.

HUMBERT A. (2012) – *Le géographe et le tapis volant*. Casa de Velázquez, Madrid, 201 p. ISBN : 978-84-96820-86-9.

HUMBERT A., COURTOT R., RENARD C. (2013) – Les paysages lus du ciel. De l'intérêt de la photographie aérienne oblique. *Méditerranée*, 120, 111-126. DOI : 10.4000/mediterranee.6748.

HUMBERT A., RENARD-GRANDMONTAGNE C. (2020) – 100 ans de visions et lectures aériennes. *Bulletin de l'Association de géographes français*, 97 (1-2), 48-63. DOI : 10.4000/bagf.6322.

HUPY J. P., SCHAETZL R. J. (2006) – INTRODUCING « BOMBTURBATION, » A SINGULAR TYPE OF SOIL DISTURBANCE AND MIXING. *Soil Science*, 171 (11), 823-836. DOI : 10.1097/01.ss.0000228053.08087.19.

HUPY J. P., SCHAETZL R. J. (2008) – Soil development on the WWI battlefield of Verdun, France. *Geoderma*, 145 (1-2), 37-49. DOI : 10.1016/j.geoderma.2008.01.024.

HURARD S. (2019) – L'archéologie du monde contemporain. *Culture et Recherche*, 139, 13-14.

HUSSON J.-P. (2013) – La lisière forestière, espace-temps. *Revue de géographie historique*, 3, 13. DOI : 10.4000/geohist.3548.

ICOMOS (2017) – *The Seville Principles: International Principles of Virtual Archaeology*. Ratified by the 19th ICOMOS General Assembly, New-Delhi, 27 p.

IGN (2012) – *SER B 43 : Champagne crayeuse*. IGN, Saint-Mandé, 9 p. URL : http://inventaire-forestier.ign.fr

IGN (2017) – *BD ALTI® Version 2.0 - Descriptif de contenu*. Descriptif de contenu, IGN, Saint-Mandé, 38 p. URL : https://geoservices.ign.fr/documentation/donnees/alti/bdalti

IGN (2018a) – *BD Forêt® Version 2.0 - Descriptif de contenu*. Descriptif de contenu, IGN, Saint-Mandé, 52 p. URL : https://geoservices.ign.fr/documentation/donnees/vecteur/bdforet

IGN (2018b) – *RGE ALTI® Version 2.0 - Descriptif de contenu*. Descriptif de contenu, IGN, 29 p. URL : https://geoservices.ign.fr/documentation/donnees/alti/rgealti

IGN (2021) – *BD ORTHO® Historique Version 1.0 - Descriptif de contenu*. Descriptif de contenu, IGN, Saint-Mandé, 16 p.

IGN (2022) – *BD ORTHO® Version 2.0 - Descriptif de contenu*. Descriptif de contenu, IGN, Saint-Mandé, 17 p.

IGN (2023a) – *Comparatif OCSGE et CoSIA*. IGN, Saint-Mandé, 3 p. URL : https://geoservices.ign.fr/sites/default/files/2025-04/Comparatif_OCSGE_CoSIA_IGN_2023.pdf

IGN (2023b) – *SCAN 50® Historique Version 1.0 - Descriptif de contenu*. Descriptif de contenu, IGN, 31 p. URL : https://geoservices.ign.fr/sites/default/files/2025-04/Comparatif_OCSGE_CoSIA_IGN_2023.pdf

IGN (2025a) – *BD TOPO® Version 3.5 - Descriptif de contenu*. Descriptif de contenu, IGN, Saint-Mandé, 422 p. URL : https://geoservices.ign.fr/sites/default/files/2025-12/DC_BDTOPO_3-5.pdf

IGN (2025b) – *OCS GE NG - Descriptif de contenu*. Descriptif de contenu, IGN, Saint-Mandé, 29 p. URL : https://geoservices.ign.fr/sites/default/files/2025-10/DC_OCSGE_NG.pdf

JAVELLE J.-P., LE ROY LADURIE E., ROUSSEAU D. (2016) – Sur l'histoire du climat en France : le XIXe siècle. *La Météorologie*, 8 (92), 21. DOI : 10.4267/2042/58218.

JENNESS J. (2006) – *Topographic Position Index extension for ArcView 3.x, v. 1.3a*. Jenness Enterprises, Flagstaff, 42 p.

JOLY D., BROSSARD T., CARDOT H., CAVAILHES J., HILAL M., WAVRESKY P. (2010) – Les types de climats en France, une construction spatiale. *Cybergeo*, 501. DOI : 10.4000/cybergeo.23155.

KALUZKO J.-L. (2016) – « Douaumont ist gefallen » et alors …. *Tranchées, Un regard nouveau sur la Grande Guerre*, 24, 36-47.

KOKALJ Ž., ČOŽ N. (2025) – Advancement of relief interpretation with a complex combination of visualization techniques. Poster. DOI : 10.13140/RG.2.2.19992.66563.

KOKALJ Ž., HESSE R. (2017) – *Airborne laser scanning raster data visualization*. ZRC SAZU, Založba ZRC, Ljubljana, 90 p. ISBN : 978-961-254-984-8.

KOKALJ Ž., SOMRAK M. (2019) – Why Not a Single Image? Combining Visualizations to Facilitate Fieldwork and On-Screen Mapping. *Remote Sensing*, 11 (7), 747. DOI : 10.3390/rs11070747.

KOKALJ Ž., ZAKŠEK K., OŠTIR K. (2011) – Application of sky-view factor for the visualization of historic landscape features in lidar-derived relief models. *Antiquity*, 85 (327), 263-273. DOI : 10.1017/S0003598X00067594.

KONG Z., FEI R., CHENG Y., WANG X., XU N., WANG Z., ZHENG K., ZHAO C., LIU D., HUA D., GONG Z., PENG W., MEI L. (2025) – Imaging-based lidar for atmospheric remote sensing: A review. *Optics & Laser Technology*, 191, 113354. DOI : 10.1016/j.optlastec.2025.113354.

KOTTEK M., GRIESER J., BECK C., RUDOLF B., RUBEL F. (2006) – World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15 (3), 259-263. DOI : 10.1127/0941-2948/2006/0130.

KRAEMER C., ANCELIN P.-Y. (2023) – Archéogéographie et géoarchéologie du premier Remiremont – AGER. Pour une archéologie environnementale du massif forestier du Fossard (Vosges). *Source(s) – Arts, Civilisation et Histoire de l'Europe*, 21, 19-46. DOI : 10.57086/sources.855.

KRISTÓ G. (2000) – *Histoire de la Hongrie médiévale. Tome I : Le temps des Arpads*. Presses universitaires de Rennes, Rennes, 230 p. ISBN : 978-2-7535-2496-5.

LACOSTE Y. (2003) – *De la géopolitique aux paysages : dictionnaire de la géographie*. Armand Colin, Paris, 413 p. ISBN : 978-2-200-26538-0.

LACROIX (1909) – *Inspection des fortifications en 1909 : Reims - Laon - La Fère*. Ministère de la guerre, Paris, 12 p.

LAPLAIGE C. (2012) – *Comparaison de signaux (géophysique, LiDAR) utilisés dans l'étude des dynamiques anthropiques et naturelles*. Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, Besançon, 494 p. URL : https://theses.hal.science/tel-00732379v2

LARATTE S. (2022a) – *Fort de Nogent l'abbesse, construction du modèle photogrammétrique du fort de Nogent l'Abbesse*. Rapport méthodologique, Reims, 10 p.

LARATTE S. (2022b) – *Les ressources en pierre de construction dans le bâti antique de Reims et leur utilisation, application à l'étude de la Porte de Mars*. Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, Reims, 521 p.

LARATTE S. (2024) – Les matériaux du fort de Nogent. In : COUTANT C., SCHIMDT F., QUANTINET D. (éds), *Sorti de l'oubli*. Éditions de l'Effervescence, Reims, Epernay, 46-50.

LAROCHELLE M., DÉSAUTELS J. (1992) – *Autour de l'idée de science : itinéraires cognitifs d'étudiants et d'étudiantes*. De Boeck-Wesmael, Bruxelles, 314 p. ISBN : 978-2-8041-1572-2.

LAURAIN M. (1986) – Feuille n°158 : *Carte géologique à 1/50 000 d'Avize*. Notice explicative de la carte géologique, BRGM, Orléans, 37 p.

LAURAIN M., GUÉRIN H., BARTA L. (1976) – Feuille n°131 : *Carte géologique à 1/50 000 de Fismes*. Notice explicative de la carte géologique, BRGM, Orléans, 34 p.

LAURAIN M., GUÉRIN H., DURAND R. (1981) – Feuille n°132 : *Carte géologique à 1/50 000 de Reims*. Notice explicative de la carte géologique, BRGM, Orléans, 34 p.

LAURAIN M., GUÉRIN H., MARRE A., RICHARD E. J. (1995) – Processus Génétiques à l'origine des Formations de Pente à Graviers de Craie en Champagne. *Permafrost and Periglacial Processes*, 6 (2), 103-108. DOI : 10.1002/ppp.3430060207.

LAURAIN M., MEYER R. (1986) – Stratigraphie et Paléogéographie de la base du Paléogène champenois. *Géologie de la France*, 1, 103-123.

LAVAL P. (1927) – *Rapport de la commission des finances, chargée d'examiner le projet de loi, adopté par la Chambre des Députés, portant fixation du budget général de l'exercice 1928, Ministère des travaux publics, rapport n°680 du Sénat en session extraordinaire, annexe au procès-verbal de la séance du 13 décembre 1927*.

LE BAS C. (1984) – *Histoire sociale des faits économiques : La France au XIXe siècle*. Presses universitaires de Lyon, Lyon, ISBN : 978-2-7297-0221-2.

GÉLY J.-P., HANOT F. (dir.) (2014) – *Le bassin parisien : un nouveau regard sur la géologie.* Association des géologues du bassin de Paris, Paris, 228 p. ISBN : 978-2-9550042-0-3.

LE HALLÉ G. (2001) – *Le système Séré de Rivières ou le Témoignage des pierres : la France et Verdun*. Ysec éd, Louviers, ISBN : 978-2-84673-008-2.

LE PAUVREMOYNE J. (1957) – Les invasions normandes en Gaule et en Neustrie. Essai d'explication et de bilan. *Études Normandes*, 81, 197-212.

LE ROUX J., HARMAND D. (1998) – Contrôle morphostructural de l'histoire d'un réseau hydrographique : le site de capture de la Moselle. *Geodinamica Acta*, 11 (4), 149-162. DOI : 10.1016/S0985-3111(98)80001-6.

LE ROY LADURIE E. (2020) – *Histoire du climat depuis l'an mil*. Flammarion, Paris, 384 p. ISBN : 978-2-08-145198-8.

LE ROY LADURIE E., ROUSSEAU D. et VASAK A. (éd.) (2011) – *Les fluctuations du climat : de l'an mil à nos jours*. Fayard, Paris, 321 p. ISBN : 978-2-213-65424-9.

LEGAY J.-L. (2018) – L'artillerie lourde sur voie ferrée de Châlons-sur-Vesle à Trigny. *Études marnaises*, 94, 30-36.

LEJEUNE O., DEVOS A. (2001) – Caractéristiques et spécificités du karst de la Montagne de Reims ; comparaison avec les autres karsts de contact lithostratigraphique de l'est du Bassin parisien. *Revue Géographique de l'Est*, 41 (4). DOI : 10.4000/rge.3933.

LEJEUNE O., MARRE A., DEVOS A., LAURAIN M., BROCANDEL M., BRULHET J. (2002) – Les phases d'incision de la vallée de la Marne entre Joinville et Vitry-le-François (Est du bassin parisien / France). *Revue Géographique de l'Est*, 42 (4). DOI : 10.4000/rge.2652.

LENDA S. (2015) – *Témoignages de trois siècles d'occupations militaires dans la Trouée de Belfort (XVIIIe-XXe siècles)*. Rapport final d'opération, D108538, Inrap, Dijon, 58 p.

LIN Z., KANEDA H., MUKOYAMA S., ASADA N., CHIBA T. (2013) – Detection of subtle tectonic–geomorphic features in densely forested mountains by very high-resolution airborne LiDAR survey. *Geomorphology*, 182, 104-115. DOI : 10.1016/j.geomorph.2012.11.001.

LINDSAY J. B., COCKBURN J. M. H., RUSSELL H. A. J. (2015) – An integral image approach to performing multi-scale topographic position analysis. *Geomorphology*, 245, 51-61. DOI : 10.1016/j.geomorph.2015.05.025.

LIPS J. (2024) – *Faune des souterrains du fort de Bron (69)*. Inventaire faunistique inédit, Fort de Bron, 167 p.

LLOYD D. W. (1998) – *Battlefield Tourism: Pilgrimage and the Commemoration of the Great War in Britain, Australia and Canada, 1919-1939*. Berg Publishers, Oxford, 251 p.

LORENZ J., LORENZ C. (1993) – De la roche à la construction : la localisation et la reconnaissance des carrières. In : LORENZ J., GÉLY J.-P. (dir.), *Carrières et constructions en France et dans les pays limitrophes*. CTHS, Paris, 9-29. ISBN : 978-2-7355-0283-7.

LOZIĆ E., ŠTULAR B. (2021) – Documentation of Archaeology-Specific Workflow for Airborne LiDAR Data Processing. *Geosciences*, 11 (1), 26. DOI : 10.3390/geosciences11010026.

LUQUET J. (2006) – La numérisation dans les services d'archives publics en France, une révolution pragmatique. *La Gazette des archives*, 204 (4), 233-253. DOI : 10.3406/gazar.2006.3838.

MANAS A., COUËTOUX J.-L. (2020) – Le prix à payer pour libérer le territoire (1ère partie). In : *Libération du territoire et reconstruction 1871-1878 : Deuxième Cahier républicain*. Observatoire de la vie politique et parlementaire, Paris, 105 p.

MANLAY A., PARMENTIER M. (2023) – Eaux souterraines en Hauts-de-France : Synthèses des principaux aquifères et hydrosystèmes. *Annales de la Société Géologique du Nord*, 30, 121-130. DOI : 10.54563/asgn.2303.

MANUFACTURE FRANÇAISE DES PNEUMATIQUES MICHELIN (éd) (1920) – *Reims et le fort de la Pompelle*. Manufacture française des pneumatiques Michelin, Clermont-Ferrand, Guides illustrés Michelin des champs de bataille 127 p.

MAQUART J.-J. (1854) – *Anciens remparts et portes de Reims album composé & dessiné par J-J Maquart et offert par sa veuve à la ville de Reims*. Maquart, Reims, 138 p.

MARCOBELLI E. (2022) – Colloques et journées d'études : un état des lieux (2012-2019). In : WEINRICH A., PATIN N. (dir.), *Quel bilan scientifique pour le centenaire 1914-1918 ?*. Sorbonne Université presses, Paris, 145-178.

MARGA A. (1876) – *Géographie militaire*. E. Bourges, Fontainebleau, 520 p.

MARGA A. (1885) – *Géographie militaire : Généralités et la France (Volume 1)*. Berger-Levrault, Paris, 448 p.

MARRE A. (1987) – Le mouvement de terrain de Rilly-la-Montagne du 23 août 1986. *Bulletin de la Société d'Etude des Sciences Naturelles de Reims*, 1, 37-40.

MARSHALL A. (1890) – *Principles of economics*. Macmillan and Co, Londres, 319 p. ISBN : 978-1-57392-140-4.

MARTIN P. (2000) – Forme et rugosité des surfaces karstiques. Conséquences pour une théorie spatiale et fractale de l'interface terrestre. *Karstologia*, 36 (1), 1-16. DOI : 10.3406/karst.2000.1748.

MATHIS A., MATHIS D. (2014) – Démilitarisation et reconversion de l'héritage militaire : L'exemple de Metz Métropole. *Projets de paysage*, 11. DOI : 10.4000/paysage.11368.

MATHIS D., CHIFFRE E., BALOUZAT-LOUBET C., NIEDERLANDER T., MATHIS A. (2020) – Quelles trajectoires paysagères pour les massifs forestiers militarisés du Grand-Est ? Essai de typologie à partir de l'étude des forêts de Bitche, de Haguenau et du Bienwald-Mundat. *Projets de paysage*, 22. DOI : 10.4000/paysage.8862.

MAYORAL A., TOUMAZET J.-P., SIMON F.-X., VAUTIER F., PEIRY J.-L. (2017) – The Highest Gradient Model: A New Method for Analytical Assessment of the Efficiency of LiDAR-Derived Visualization Techniques for Landform Detection and Mapping. *Remote Sensing*, 9 (2), 120. DOI : 10.3390/rs9020120.

MÉHAULT H. (sans date) – La Ceinture Fortifiée de Reims. Mémoire de Licence professionnelle, Université de Reims Champagne-Ardenne, Reims.

MEILLIEZ F., VAN VLIET-LANOË B. (2008) – Formations superficielles anthropiques. In : DEWOLF Y., BOURRIÉ G. (dir.), *Les formations superficielles*. Ellipses, Paris, 373-385.

MÉNILLET F. (1985) – Les meulières et les argiles à meulières : leurs rapports avec les surfaces néogène à quaternaire ancien du bassin de Paris. *Géologie de la France*, 2, 213-226.

METRAL V. (2020) – Étude de la cluse fortifiée de Joux : le cas du bourg castral de Jougne. *Bulletin du Centre d'études médiévales d'Auxerre*, 24 (2). DOI : 10.4000/cem.17547.

MEYER H. J. (1908) – *Meyers grosses Konversations-Lexikon : ein Nachschlagewerk des allgemeinen Wissens*. Bibliographisches Institut, Leipzig, 1146 p.

MICHAUD D'ARÇON J.-C.-É. (1795) – *Considérations militaires et politiques sur les fortifications*. Imprimerie de la République, Paris, 357 p.

MILLSAPS L., LARSEN T., CURTIS M., MONAKHOVA M. (2020) – Geography Education and the Borderlands: Using a Marginalized Discipline to Teach About the Margins. In : FUERST-BJELIŠ B., LEIMGRUBER W. (éd.), *Globalization, Marginalization and Conflict: Political, economic and social processes*. Springer International Publishing, Cham, 101-115. ISBN : 978-3-030-53217-8.

MILZA P. (2014) – *Les relations internationales de 1871 à 1914, 4e édition*. Armand Colin, Paris, 224 p. ISBN : 978-2-200-60087-7.

MINISTÈRE DE LA GUERRE (1877) – *Recueil des croquis d'exécution des principaux ouvrages de défense en cours de construction, Place de Reims, Batterie de Loivre*. SHD, GR 2 V 105, Vincennes.

MINISTÈRE DE LA GUERRE (1886) – *Expérience du fort de la Malmaison. Rapport complémentaire sur les expériences faites au fort de la Malmaison du 22 septembre au 25 octobre 1886*. SHD, GR 2 V 172, Vincennes, 14 p.

MINISTÈRE DE LA GUERRE (1893) – *Croquis joint au procès-verbal de conférence en date du 14 octobre 1893*. SHD, GR 9 NN 4 287 3, Vincennes, 1 p.

MINISTÈRE DE LA GUERRE (1904) – *Fort de Nogent-l'Abbesse - réparation d'un éboulement*. SHD, GR 2 V 97, Vincennes, 3 p.

MINISTÈRE DE LA GUERRE (1908) – *Rapport du Général Desoilles, Commandant Supérieur de la Défense de Reims, sur l'état actuel de la défense*. Imprimerie Nationale, Paris, 22 p.

MINISTÈRE DE LA GUERRE (1909) – *Réfection d'un éboulement au fort de Nogent*. SHD, GR 2 V 97, Vincennes, 3 p.

MINISTÈRE DE LA GUERRE (1914) – *Plan de mobilisation des ouvrages de Reims, plan de défense*. Imprimerie Nationale, Paris, 29 p.

MINISTÈRE DE LA GUERRE (1915) – *Instruction sur les travaux de campagne à l'usage des troupes de toutes armes*. Imprimerie Nationale, Paris, 438 p.

MINISTÈRE DE LA GUERRE (1917a) – *Instruction sur le tir d'artillerie*. Imprimerie Nationale, Paris, 212 p.

MINISTÈRE DE LA GUERRE (1917b) – *Instruction sur les plans directeurs et les cartes et plans spéciaux : cette instruction abroge l'instruction sur les plans directeurs du 14 février 1916, GQGA*. Imprimerie Nationale, Paris, 37 p.

MINISTÈRE DE LA GUERRE (1929) – *Première partie : terrassements d'infrastructure de voies ferrées*. Imprimerie Nationale, Paris, 131 p.

MOLLIER J.-Y. (2001) – Pacifisme et patriotisme chez les Républicains français de Sadowa à la Loi des 3 ans. In : MICHEL A.-R., VANDENBUSSCHE R. (éd.), *L'idée de paix en France et ses représentations au XXe siècle*. IRHiS, 11-21. ISBN : 978-2-905637-38-3.

MONTFERRAND A. (1999) – La fortification Séré de Rivières aujourd'hui. Perspectives pour une valorisation historique, culturelle et touristique. In : ASSOCIATION VAUBAN (éd.), *Actes du colloque Séré de Rivières d'Épinal du 14-15-16 septembre 1995*. Association Vauban, Paris, 360-368.

MONTIGNY (1937) – *Abrégé de fortification permanente*. Ecole militaire et d´application du Génie, Angers, 355 p.

MORANVILLÉ H. (1895) – Le siège de Reims, 1359-1360. *Bibliothèque de l'École des chartes - Revue d'érudition consacrée spécialement à l'étude du Moyen Âge*, 56, 90-98.

MOURET E.-S. (2021) – Des routes pour contrôler ? Aménagement des territoires de montagne et reconfiguration des mobilités au XIXe siècle. *Amnis*, 20. DOI : 10.4000/amnis.6485.

MUNRO J. H. (2000) – The « New Institutional Economics » and the Changing Fortunes of Fairs in Medieval and Early Modern Europe: the Textile Trades, Warfare, and Transaction Costs. In : CAVACIOCCHI S. (dir.), *Fieri e mercati nella integrazione delle economie europee, seccoli XIII - XVIII, Atti delle "Settimana di Studi" e altri convegni*. Le Monnier, Firenze, 405-451.

MUSÉE DU GÉNIE (sans date) – *Le redressement militaire de la France 1871-1914*. Musée du Génie, Angers, 11 p.

MUSÉE DU GÉNIE (sans date) – *Le redressement militaire de la France s'accompagne du renouveau de la fortification permanente : le système Séré de Rivières*. Musée du Génie, Angers, 5 p.

MUSÉE DU GÉNIE (sans date) – *Les défenses de Paris 1840-1940*. Musée du Génie, Angers, 6 p.

MUSSET B. (2006) – *Le vignoble de Champagne, de la naissance des vins mousseux à celle des maisons de champagne (1650-1830) : les transformations d'un univers vinicole, social et commercial*. Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, Reims, 1139 p.

MUSSLICK S., BARTLETT L. K., CHANDRAMOULI S. H., DUBOVA M., GOBET F., GRIFFITHS T. L., HULLMAN J., KING R. D., KUTZ J. N., LUCAS C. G., MAHESH S., PESTILLI F., SLOMAN S. J., HOLMES W. R. (2024) – *Automating the Practice of Science -- Opportunities, Challenges, and Implications*. arXiv (prepublication).

NEUVILLE M. (1980) – La ceinture fortifiée de Reims et le fort de la Pompelle, Mélanges d'histoire militaire. *Travaux de l'Institut de l'Académie Nationale de Reims*, 159, 91-128.

NEUVILLE M. (1999) – Le système Séré de Rivières à l'épreuve du feu : le fort de la Pompelle. In : ASSOCIATION VAUBAN (éd.), *Actes du colloque Séré de Rivières d'Épinal du 14-15-16 septembre 1995*. Association Vauban, Paris, 348–359.

NÈVES C. (2018) – Vincennes : le Service Historique de la Défense veut s'ouvrir à un public plus large. *Le Parisien*, Article de journal. URL : https://www.leparisien.fr/val-de-marne-94/vincennes-le-service-historique-de-la-defense-veut-s-ouvrir-a-un-public-plus-large-09-01-2018-7491576.php

NICOLLE A., ROUÈCHE J.-M. (1999) – Le travail des officiers du génie dans la réalisation des forts du système Séré de Rivières. In : ASSOCIATION VAUBAN (éd.), *Actes du colloque Séré de Rivières d'Épinal du 14-15-16 septembre 1995*. Association Vauban, Paris, 113-141.

NICOT J. (1969) – *Inventaire sommaire des archives de la guerre 1914-1918*. Inventaire d'archives, Service Historique de l'Armée, Paris, 700 p.

NICOT J., SCHILLINGER P., FICAT J. (1972) – *Inventaire sommaire des archives de la guerre 1914-1918*. Inventaire d'archives, Service Historique de l'Armée, Paris, 596 p.

NIOX G.-L. (1876) – *Notions de géologie, de climatologie et d'ethnographie*. Dumaine, Paris, 191 p.

NIOX G. L. (1881) – *Géographie militaire : France (Deuxième édition)*. L. Baudoin, Paris, 447 p.

NIOX G. L. (1883) – *Carte de la France et des pays voisins*. L. Baudoin, Paris, une planche.

NIOX G. L. (1891) – *Atlas de géographie générale avec notes statistiques, historiques et géographiques*. Delagrave, Paris, 34 p.

NIREI H., MEZZANO A., SATKUNAS J., FURUNO K., MARKER B., MITAMURA M. (2014) – Environmental problems associated with manmade strata and their potential management. *Episodes*, 37, 33-40.

NORLING E. (2009) – *Modelling Human Behaviour with BDI Agents*. Thèse de doctorat, Université de Melbourne, Melbourne, 261 p.

NOTE N., GHEYLE W., DEN BERGHE H. V., SAEY T., BOURGEOIS J., VAN EETVELDE V., VAN MEIRVENNE M., STICHELBAUT B. (2018) – A new evaluation approach of World War One's devastated front zone: A shell hole density map based on historical aerial photographs and validated by electromagnetic induction field measurements to link the metal shrapnel phenomenon. *Geoderma*, 310, 257-269. DOI : 10.1016/j.geoderma.2017.09.029.

NUNINGER L., FRUCHART C., OPITZ R. (2010) – LiDAR : quel apport pour l'analyse des paysages ? *AGER*, 20, 34-43.

NUNINGER L., VERHAGEN P., BERTONCELLO F. (2014) – Estimating the "memory of landscape" to model changes in archaeological settlement patterns. *Landscape Archaeology Conference*, 2014, Rome, Poster.

OGÉ F. (1988) – Les prémices de la politique de restauration des terrains en montagne. *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, 59 (1), 9-15. DOI : 10.3406/rgpso.1988.3102.

OPITZ R. S. et COWLEY D. (éd.) (2013) – *Interpreting archaeological topography: airborne laser scanning, 3D data and ground observation*. Oxbow Books, Oxford, 268 p. ISBN : 978-1-84217-516-3.

PANIZZA M. (2001) – Geomorphosites: Concepts, methods and examples of geomorphological survey. *Chinese Science Bulletin*, 46, 4-5. DOI : 10.1007/BF03187227.

PANORYIA M. (2023) – Le fort de Douaumont revisité à l'ère du numérique. *Premières journées du patrimoine fortifié*, 2023, Vincennes, Communication orale.

PARODI L., GOGNIAT L., PARADELLE N., SAYEN S., CLOSSET-KOPP D. (2024) – Les forêts se rappellent-elles la Grande Guerre ? *Anthropisation des communautés végétales en environnement changeant*, 2024, Amiens, Communication orale.

PELLUS D. (2007) – *Reims, 1000-1600 : six siècles d'événements*. D. Fradet, Reims, ISBN : 978-2-909952-19-2.

PERARNAU R. (2016) – *Etude pluridisciplinaire de sites militaires : Le champ de tir d'artillerie et le camp des Pareuses de Pontarlier (1876-1924)*. Mémoire de Master 1, Université de Bourgogne, Dijon, 51 p.

PERARNAU R., DEVOS A., QUIQUEREZ A., ANCELIN P.-Y., ORTONOVI S., COULAUD A., TABORELLI P. (accepté) – Empreinte morphologique de l'artillerie lourde de la Grande Guerre dans la montagne de Reims (Marne, France) – apport du LiDAR aéroporté. In : KRAEMER C. (dir.), *Remuer Ciel et Terre. L'apport du LiDAR en archéologie*, Actes du colloque de Saint-Étienne-lès-Remiremont, 2022.

PERARNAU R., DEVOS A., QUIQUEREZ A., BRENOT J., TABORELLI P., ORTONOVI S., FURLANI B. (2022) – Assessing the role of slope, lithology and land use in the formation and conservation of war-related geomorphic features (Case study of WW1 railway artillery in Montagne de Reims, Marne, France). *Applied Geography*, 142, 102691. DOI : 10.1016/j.apgeog.2022.102691.

PERRET J., GRIBAUDI M., BARTHELEMY M. (2015) – Roads and cities of 18th century France. *Scientific Data*, 2 (1), 150048. DOI : 10.1038/sdata.2015.48.

PICHARD C. (2014) – *La construction de la forme urbaine : approche archéologique et archéogéographique du processus urbain de Reims du début du Moyen Age à la ville préindustrielle*. Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, Reims, 484 p.

PIERRON É. (1878) – *Les méthodes de guerre actuelles et vers la fin du XIXe siècle*. Librairie militaire de J. Dumaine, Paris, 1772 p.

POINSIGNON A.-M. (1877) – *Atlas de géographie physique, administrative, historique et archéologique des 32 cantons de la Marne*. Erhard, Paris, 31 cartes.

POMEROL Ch. (1975) – Feuille n°108 : *Carte géologique à 1/50 000 d'Asfeld-La-Ville*. Notice explicative de la carte géologique, BRGM, Orléans, 18 p.

POMMIER C. (2016) – Armer les fortifications : l'artillerie et ses évolutions du XVIIe au début du XXe siècle. Perspectives maritimes. In : *Festival d'Architecture : Le patrimoine militaire de l'Ile de Ré du Moyen Age à la Seconde Guerre mondiale*. Communauté de communes de l'Ile de Ré, Saint-Martin-de-Ré.

POULLAIN E. (2014) – *Exploitation de l'intensité du signal LASER d'un LiDAR topographique aéroporté pour des environnements littoraux sableux*. Thèse de doctorat, Université de Caen, Caen, 194 p.

POVILLON-PIÉRARD É.-F.-X. (1826) – *Tableau historique et statistique de la montagne et du village de Brimont, près de Reims*. Imprimerie Boniez-Lambert, Châlons, 52 p. URL : https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k6518734c.texteBrut

PRICE S. J., FORD J. R., COOPER A. H., NEAL C. (2011) – Humans as major geological and geomorphological agents in the Anthropocene: the significance of artificial ground in Great Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369 (1938), 1056-1084. DOI : 10.1098/rsta.2010.0296.

PRUSSIN A. J., MARR L. C. (2015) – Sources of airborne microorganisms in the built environment. *Microbiome*, 3, (1), 78. DOI : 10.1186/s40168-015-0144-z.

QUANTINET D. (2024) – Histoire viticole du Mont de Berru avant la Grande Guerre. In : COUTANT C., SCHMIDT F., QUANTINET D., *Sorti de l'oubli*. Éditions de l'Effervescence, Reims, Epernay, 8-17.

QUÉLOZ D. (2009) – *De la manœuvre napoléonienne à l'offensive à outrance : la tactique générale de l'armée française, 1871-1914*. Institut de stratégie comparée Économica, Paris, 564 p.

RASSAT G., TOUMAZET J. P., CERBELAUD F., ALLÉE P. (2015) – Le LiDAR : pour une histoire renouvelée des forêts charbonnées de plaine charentaises. Approche classique et détection semi-automatisée des plateformes de charbonnage. *XXe colloque d'archéométrie du GMPCA*, 2015, Besançon, Poster.

REITEL F. (1994a) – La défense de Paris et ses conséquences sur l'aménagement, de 1840 à 1919. In : *Fortifications et patrimoine militaire en Île-de-France : mémoire, obsolescence, conservation, réutilisation ?* CREPIF, Paris, 83-101.

REITEL F. (1994b) – Le rôle de l'armée dans la conservation des forêts en France. *Bulletin de l'Association de géographes français*, 61 (502), 143-154. DOI : 10.3406/bagf.1984.5462.

RENAN E. (1871) – *La réforme intellectuelle et morale de la France*. Michel-Lévy frères, Paris, 339 p. URL : https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b86267612

REYNARD E. (2005) – Géomorphosites et paysages. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 11 (3), 181-188. DOI : 10.4000/geomorphologie.338.

RICCIOLI J.-L. (1999) – Le Comité de défense. In : ASSOCIATION VAUBAN (éd.), *Actes du colloque Séré de Rivières d'Épinal du 14-15-16 septembre 1995*. Association Vauban, Paris, 95-112.

RICHARD P. (1998) – *Le fort du Mont-Vaudois : Héricourt, Haute-Saône un fort type Séré de Rivières*. Autoédition, Montbéliard. ISBN : 978-2-9512493-5-6.

RICHARD P. (1999) – *La mélinite ou La crise de l'obus-torpille*. Autoédition, Montbéliard. ISBN : 978-2-9514193-0-8.

RICHARD P. (2001) – *Un nom célèbre : aux forts du système Séré de Rivières 1886-1887 frontières Nord et Nord-Est*. Autoédition, Montbéliard. ISBN : 978-2-9514193-8-4.

RICHARD P. (2007) – *Le permis de construire d'un fort Séré de Rivières*. Autoédition, Montbéliard, 100 p.

RICHARD P. (2009) – *Comité de défense : procès-verbaux des séances : fortifications Séré de Rivières. 1ère partie, Du 5 août 1872 au 26 mai 1876*. Autoédition, Montbéliard, 101 p.

RICHARD P. (2011) – *Glossaire Fortifications Séré de Rivières (Première et deuxième parties)*. Autoédition, Montbéliard, 180 p.

RILEY S., DEGLORIA, ELLIOT S. D. (1999) – A Terrain Ruggedness Index that Quantifies Topographic Heterogeneity. *International Journal of Science*, 5, 23-27.

RIOU A. (2022) – Les apports du Lidar dans le massif de Lorris-les Bordes en forêt d'Orléans (Loiret) : le cas de l'abbaye du Chaumontois et sa métairie. *Revue archéologique du Loiret et de l'axe ligérien*, 42, 71-80.

RITZ S. (2020) – *Senon-Amel (Meuse) : contribution d'une agglomération bipolaire à l'histoire du fait urbain dans le nord-est de la Gaule, du second âge du Fer au haut Moyen Âge*. Université de Lorraine, Nancy, 437 p.

RITZ S., SZTUKA J.-C. (2024) – L'occupation de l'arrière-front allemand dans le secteur de Spincourt (Meuse) révélée par le LiDAR : état des recherches en cours. In : BILLARD C., CARPENTIER V., JACQUEMOT S., LANDOLT M., LEGENDRE J.-P., MARCIGNY C. (dir.), *Actes des colloques de Verdun à Caen (2018-2019)*. Presses Universitaires de Rennes, Rennes, 103-114.

ROCHEL X. (2015) – La fin des vides en forêt : Essais de cartographie historique. *Revue Forestière Française*, 6, 539-556. DOI : 10.4267/2042/60722.

ROCHEL X. (2016) – *Paysages naturels, paysages construits*. Habilitation à diriger la recherche, Université de Lorraine, Nancy, 210 p.

ROCHEL X. (2022) – Que reste-t-il de la ceinture maraîchère de Nancy ? *Revue de géographie historique*, 21-22, 12. DOI : 10.4000/geohist.6205.

ROCHEL X., ABADIE J., AVON C., BERGÈS L., CHAUCHARD S., DEFEVER S., GREL A., JEANMONOD J., LEROY N., DUPOUEY J.-L. (2017a) – Quelles sources cartographiques pour la définition des usages anciens du sol en France ?. *Revue Forestière Française*, 69 (4), 353-370.

ROCHEL X., ANCELIN P.-Y., KRAEMER C. (accepté) – Les dynamiques paysagères du massif du Fossard de 1830 à nos jours. In : KRAEMER C. (dir.), *Remuer Ciel et Terre. L'apport du LiDAR en archéologie*, Actes du colloque de Saint-Étienne-lès-Remiremont, 2022.

ROCHEL X., HECKER A., VERDIER A. (2017b) – Un patrimoine pour la marche. Les sentiers vignerons de Nancy. *Cybergeo*, 18. DOI : 10.4000/cybergeo.28517.

ROCOLLE P. (1939) – *Le Béton « paye »-t-il ? Le cas typique de Manonviller dans la bataille de Lorraine*. Charles-Lavauzelle, Limoges, 153 p.

ROCOLLE P. (1973) – *2000 ans de fortifications françaises (tome I)*. Charles-Lavauzelle, Limoges, 365 p.

ROCOLLE P. (2002) – La crise de l'obus-torpille en France. *Revue internationale d'histoire militaire*, 82, 115-136.

ROLLIN J. (1915) – *Ce que j'ai vu de la guerre*. Constable and company limited, London, 142 p.

ROSSER B. J., JONES K. E. (2022) – *Application of LiDAR differencing to assess sediment load in the upper Waipaoa River, 2005–2019. Lower Hutt (Nouvelle-Zélande)*. Rapport d'étude, GNS, Lower Hutt, 55 p.

ROUSSEAU D. (2009) – Les températures mensuelles en région parisienne de 1676 à 2008. *La Météorologie*, 8 (67), 43. DOI : 10.4267/2042/30038.

ROUSSEAU P. (1990) – L'Évolution des forêts françaises métropolitaines d'après les statistiques forestières. *Revue Forestière Française*, 42 (1), 56-68.

ROUXEL-DAVID E. (2002) – *Cartographie de la piézométrie de la nappe de la craie en Champagne-Ardenne*. Rapport intermédiaire, BRGM, Orléans, 17 p. URL : https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-52018-FR.pdf

SAINT-HILAIRE O. (2024) – *Pollution des sols déchets de guerre : une histoire environnementale, économique et anthropologique du désobusage (1914-2019)*. Thèse de doctorat, École des Hautes Études en Sciences Sociales, Paris, 580 p.

SALAT N. (2011) – Le Dépôt des fortifications et ses archives (1660-1940). *Revue Historique des Armées*, 265, 113-117.

SALAT N., BARROS M. (1997) – *Répertoire numérique détaillé de la sous-série 2V, section technique du génie 1886-1940*. Inventaire d'archives, Service Historique de l'Armée, Paris, 178 p.

SALAT N., BARROS M. (2005) – *Archives du service des cuirassements (1877–1927), inventaire semi-analytique, département de l'armée de terre, sous-série 2 V (2 V 290 à 361)*. Inventaire d'archives, Service Historique de l'Armée, Paris, 294 p.

SALIGNY L. (2013) – Apport des technologies LiDAR pour la recherche en archéologie. In : *Assemblée générale « Interférences d'Ondes »*. Maison des Sciences de l'Homme de Dijon / CNRS-Université de Bourgogne, Dijon, 1-4.

SARDAIN M.-F. (2014) – Les servitudes militaires autour des fortifications au XIXe siècle. *Revue Historique des Armées*, 274, (1), 3-14. DOI : 10.3917/rha.274.0003.

SCAMMACCA O., BÉTARD F. (2026) – The multiple dimensions of geodiversity. *Communications Sustainability*, 1 (1), 15. DOI : 10.1038/s44458-025-00017-3.

SCHENK D. (2014) – Pouvoir de l'archive et vérité historique. *Écrire l'histoire*, 13-14, 35-53. DOI : 10.4000/elh.463.

SCHINDLING J., GIBBES C. (2014) – LiDAR as a tool for archaeological research: a case study. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 6 (4), 411-423. DOI : 10.1007/s12520-014-0178-3.

SCHWARTZ D., ROBIN V., ADAM P., SCHAEFFER P., GEBHARDT A., HERRAULT P.-A., KELLER B., DAPIAGGI D., STEVENEL C., THISS M., TRAUTMANN M., ERTLEN D. (2020) – Les géosciences au service de l'archéologie agraire. Une étude de cas sur les rideaux de culture de Goldbach (68). *Archimède. Archéologie et histoire ancienne*, 7, 205-216. DOI : 10.47245/archimede.0007.act.08.

SÉRÉ DE RIVIÈRES R. A. (1873) – *Considérations sur la reconstitution de la frontière de l'Est*. Mémoire, Comité de défense, Paris, 38 p.

SÉRÉ DE RIVIÈRES R. A. (1874) – *Exposé sur le système défensif de la France*. Mémoire, Comité de défense, Paris.

SERVICE DES PONTS ET CHAUSSÉES ET DES CHEMINS VICINAUX (1878) – *Atlas du département de la Marne contenant 31 cartes, dressé, suivant décision du Conseil général, en date du 16 avril 1874, par le service des Ponts et Chaussées et des Chemins vicinaux*. Erhard, Paris, 30 cartes.

SEVARA C., PREGESBAUER M., DONEUS M., VERHOEVEN G., TRINKS I. (2016) – Pixel versus object — A comparison of strategies for the semi-automated mapping of archaeological features using airborne laser scanning data. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 5, 485-498. DOI : 10.1016/j.jasrep.2015.12.023.

SIMOUTRE C. (1889a) – *École d'application de l'artillerie et du génie. Cours de fortification permanente, 2e partie, 1re section. Détail des fortifications construites de 1870 à 1885 (Planches)*. École d'application de l'artillerie et du Génie, Fontainebleau, 64 p.

SIMOUTRE C. (1889b) – *École d'application de l'artillerie et du génie. Cours de fortification permanente, 2e partie, 1re section. Détail des fortifications construites de 1870 à 1885 (Texte)*. École d'application de l'artillerie et du Génie, Fontainebleau, 174 p.

SITTLER B., HAUGER K. (2007) – Les apports du laser aéroporté à la documentation de parcellaires anciens fossilisés par la forêt : l'exemple des champs bombés de Rastatt en Pays de Bade. In : DUPOUEY J.-L., DAMBRINE E., DARDIGNAC C., GEORGES-LEROY M. (éd.), *La mémoire des forêts*, Actes du colloque « Forêt, archéologie et environnement ». ONF-INRA-DRAC Lorraine, Paris, 155-161.

SPELLING R. (1917) – *Von Reims bis zu den Argonnen*. Grethlein, Leipzig, 192 p.

STÉVENIN M. (1998) – *Les « malheurs des temps » et l'assistance en champagne entre 1620 et 1660*. IRHiS, Villeneuve d'Ascq, 1036 p. ISBN : 978-2-284-00294-9.

STICHELBAUT B. (2009) – *World War One aerial photography: an archaeological perspective*. Thèse de doctorat, Ghent University, Ghent, 416 p.

STICHELBAUT B. (2011) – The first thirty kilometers of the western front 1914-1918: an aerial archeological approach with historical remote sensing data. *Archaeological Prospection*, 18 (1), 57-66. DOI : 10.1002/arp.397.

STICHELBAUT B., BOURGEOIS J., SAUNDERS N., CHIELENS P. (2009) – *Images of Conflict: Military Aerial Photography and Archaeology*. Cambridge Scholars Publishing, Cambridge, 320 p. ISBN : 978-1-4438-0171-3. URL : http://hdl.handle.net/1854/LU-481438

STICHELBAUT B., COUCKE D., PASSMORE D. G., VAN DE WINKEL J., DE MULDER G. (2023) – LiDAR and conflict archaeology: the Battle of the Bulge (1944–1945). *Antiquity*, 97 (394), 945-963. DOI : 10.15184/aqy.2023.95.

STICHELBAUT B., DE CLERCQ W., HERREMANS D., BOURGEOIS J. (2013) – First World War Aerial Photography and Medieval Landscapes: Moated Sites in Flanders. In : HANSON W. S., OLTEAN I. A. (éd.), *Archaeology from Historical Aerial and Satellite Archives*. Springer, New York, 69-85. ISBN : 978-1-4614-4504-3.

STICHELBAUT B., GHEYLE W., SAEY T., VAN EETVELDE V., VAN MEIRVENNE M., NOTE N., VAN DEN BERGHE H., BOURGEOIS J. (2016) – The First World War from above and below. Historical aerial photographs and mine craters in the Ypres Salient. *Applied Geography*, 66, 64-72. DOI : 10.1016/j.apgeog.2015.11.020.

ŠTULAR B., EICHERT S., LOZIĆ E. (2021) – Airborne LiDAR Point Cloud Processing for Archaeology. Pipeline and QGIS Toolbox. *Remote Sensing*, 13 (16), 3225. DOI : 10.3390/rs13163225.

ŠTULAR B., KOKALJ Ž., OŠTIR K., NUNINGER L. (2012) – Visualization of lidar-derived relief models for detection of archaeological features. *Journal of Archaeological Science*, 39 (11), 3354-3360. DOI : 10.1016/j.jas.2012.05.029.

ŠTULAR B., LOZIĆ E., EICHERT S. (2021) – Airborne LiDAR-Derived Digital Elevation Model for Archaeology. *Remote Sensing*, 13 (9), 21. DOI : 10.3390/rs13091855.

TABEAUD M., BROWAEYS X. (2019) – Les paysages funéraires de la Grande Guerre en Champagne. *Géographie et cultures*, 110, 117-138. DOI : 10.4000/gc.12257.

TABORELLI P. (2018) – *Les conditions géographiques et l'organisation spatiale du front de la Grande Guerre : application à l'évaluation environnementale post-conflit en Champagne-Ardenne (France)*. Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, Reims, 425 p. URL : http://www.theses.fr/2018REIML004

TABORELLI P., BOLLOT N., DEVOS A., DODICI M., DESFOSSES Y., BRÉNOT J. (2016) – Apport des plans directeurs sur la compréhension de l'organisation spatiale du front durant la Grande Guerre. Application à l'Argonne. *Revue de géographie historique*, 8. DOI : 10.4000/geohist.5426.

TABORELLI P., DEVOS A., LARATTE S., BRENOT J., CANCÈS B., DESFOSSÉS Y. (2017a) – Apport des plans directeurs et de l'outil LiDAR aéroporté pour la caractérisation des impacts morphologiques de la Grande Guerre : exemple de la cote 108 (Berry-au-Bac, France). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 23 (2), 155-169. DOI : 10.4000/geomorphologie.11711.

TABORELLI Pierre, DEVOS A., LARATTE S., DESFOSSES Y., BRÉNOT J. (2017b) – Typologie et organisation spatiale des « polémo-formes » de la Grande Guerre révélées par l'outil LiDAR et les Plans directeurs. Application à la Champagne et à l'Argonne. *Revue de géographie historique*, 10-11. DOI : 10.4000/geohist.925.

TARGE G. (1930) – *La garde de nos frontières : constitution et organisation des forces de couverture*. Charles-Lavauzelle, Limoges, 134 p.

TAROLLI P. (2014) – High-resolution topography for understanding Earth surface processes: Opportunities and challenges. *Geomorphology*, 216, 295-312. DOI : 10.1016/j.geomorph.2014.03.008.

TÉNOT E. (1886) – *Les nouvelles défenses de la France, la frontière (1870-1882)*. Librairie Germer Baillère et cie, Paris, 452 p.

THEAU J.-P., CRUZ P., FALLOUR D., JOUANY C., LECLOUX E., DURU M. (2010) – Une méthode simplifiée de relevé botanique pour une caractérisation agronomique des prairies permanentes. *Fourrages*, 201, 19-25.

THIEBAUT P. (1987) – Les fortifications Séré de Rivières dans le Toulois. *Études Touloises*, 42, 5-20.

THIEBAUT P. (2012) – Le réseau des forts : Le fort Pélissier à Pont-Saint-Vincent. *Études Touloises*, 141, 55-63.

THIRY M. (2007) – *Les Argiles à Meulières de la Ferté-sous-Jouarre : memento pour une visite*. Document pédagogique, École nationale supérieure des Mines de Paris (Centre de géosciences), Fontainebleau, 11 p.

THORNBUSH M. J. (2012) – Archaeogeomorphology as an application in physical geography. *Applied Geography*, 34, 325-330. DOI : 10.1016/j.apgeog.2011.12.005.

THORNBUSH M. J. (2013) – Introduction: Archaeogeomorphology (Geomorphology, Culture, and Place). *Applied Geography*, 42, 155-156.

TOUMAZET J.-P., VAUTIER F., ROUSSEL E., DOUSTEYSSIER B. (2017) – Automatic detection of complex archaeological grazing structures using airborne laser scanning data. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 12, 569-579. DOI : 10.1016/j.jasrep.2017.03.012.

TOURNOUX C. (1927) – *Ecole militaire et d'application du génie. Division d'application A, 1ère année. Cours de fortification : 3e partie, fortification permanente, 3e section, la fortification permanente pendant la guerre de 1914-1918 (planches)*. Lithographie de l'école, Versailles, 54 p. URL : https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k65580980/f10.item

TOUZET T., LALLEMANT T. (2016) – *Méthodologie nationale pour le géoréférencement et la numérisation des cartes d'état-major, minutes au 1:40 000*. Rapport méthodologique, IGN, Saint-Mandé, 178 p.

TRIOLET J., TRIOLET L. (2011) – *La guerre souterraine – sous terre, on se bat aussi*. Perrin, Paris, 348 p.

TRUTTMANN P. (1992) – Les périodes Haxo, Séré de Rivières et Maginot (XIXe-XXe). In : *Quel avenir pour le patrimoine fortifié ?*. Direction du patrimoine, Lille, 31-34. ISBN : 2-11-089-256 256-0.

TRUTTMANN P. (1994) – Patrimoine et fortification : libres réflexions d'un solitaire. In : *Fortifications et patrimoine militaire en Île-de-France : mémoire, obsolescence, conservation, réutilisation ?* CREPIF, Paris, 160.

TRUTTMANN P. (2009) – *La Muraille de France ou la Ligne Maginot*. Gerard Klopp, 448 p.

TRUTTMANN P. (2017) – *La Barrière de Fer : l'Architecture des Forts du Général Séré de Rivières (1872-1914)*. Gérard Klopp, Mondorf-les-Bains, 542 p. ISBN : 2-911992-94-6.

TURMEL A. (2014) – *Répartition et utilisation des pierres et géomatériaux de construction dans le bâti du Pays rémois - analyse spatiale et propriétés pétrophysiques*. Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, Reims, 492 p.

VALLAURI D., GREL A., GRANIER E., DUPOUEY J.-L. (2012) – *Les forêts de Cassini. Analyse quantitative et comparaison avec les forêts actuelles*. Rapport technique, WWF, 658 p.

VAN KERKUM G. (1999) – La fortification néerlandaise au XIXe siècle. In : ASSOCIATION VAUBAN (éd.), *Actes du colloque Séré de Rivières d'Épinal du 14-15-16 septembre 1995*. Association Vauban, Paris, 256-262.

VAN YPERSELE L. (2013) – Tourisme de mémoire, usages et mésusages : le cas de la Première Guerre mondiale. *Témoigner. Entre histoire et mémoire*, 116, 13-21. DOI : 10.4000/temoigner.267.

VERDIER A. (2013) – Redécouvrir le saltus : l'exemple des pâquis lorrains. *Revue de géographie historique*, 3. DOI : 10.4000/geohist.3718.

VIDAL J. (2020) – *Bibracte LiDAR, 3D Model*. Sketchfab. URL : https://sketchfab.com/3d-models/bibracte-lidar-6b1d2554feb64f888345dcca66a97421

VIDAL J. (2023) – *LiDAR HD du château de Montrond (39)*. Sketchfab. URL : https://sketchfab.com/3d-models/lidar-hd-du-chateau-de-montrond-39-2793b82d0d0c4c87a8b119602aa2f5c4

VILLATE R. (1925) – *Les conditions géographiques de la guerre sur le front français de 1914 à 1918*. Payot, Paris, 325 p.

VON SAUER G. (1885) – *Taktische Untersuchungen über neue Formen der Befestigungskunst (Études tactiques sur les nouvelles formes de l'art de la fortification)*. R. Wilhelmi, Berlin, 41 p.

WALTERS M. (2024) – *Vegetation stripped off/Vegetation on (via RGB data layer) of Vauban's 1686-90 fortress*. X. URL : https://x.com/MarkWalters_/status/1671864864770347011

WANDSNIDER L. (1992) – Archaeological landscape studies. In : ROSSIGNOL J., WANDSNIDER L. (éd.), *Space, time, and archaeological landscapes*. Plenum Press, Londres, 285-292.

WAR OFFICE (1893) – *Textbook of fortification and military engineering: Volume 2, Part 2*. H.M. Stationery Office, 578 p. URL : https://play.google.com/store/books/details?id=NmlKAAAAYAAJ&rdid=book-NmlKAAAAYAAJ&rdot=1&pli=1

WARNKE M. (2013) – *Political Landscape: the Art History of Nature*. Reaktion Books, London, 165 p. ISBN : 978-1-78023-234-8.

WEHR A. (2018) – LiDAR Systems and Calibration. In : SHAN J., TOTH C. K. (éds.), *Topographic laser ranging and scanning: principles and processing*. CRC Press, Boca Raton, 159-200. ISBN : 978-1-4987-7227-3.

WEINMANN J. (1925) – *Guide historique Jivé : La guerre de 1914-1918 dans la marne - No 1. Les Positions Françaises et Allemandes à l'Est de Reims : La Pompelle et sa région la Montagne de Reims*. H. Champion, Paris, 392 p.

WEINRICH A., PATIN N. (2022) – *Quel bilan scientifique pour le centenaire de 1914-1918 ?* Sorbonne Université Presses, Paris, Mondes contemporains, 503 p. ISBN : 979-10-231-0706-7.

WEST L. J., FARRELL R. P., FOLEY A. E., HOWLETT P. R., MASSEI N. (2023) – An introduction to the chalk aquifers of northern Europe. *Geological Society, London, Special Publications*, 517 (1), 1-14. DOI : 10.1144/SP517-2023-3.

WIEDEMANN J.-F. (1976) – L'escarpement septentrional de la Montagne de Reims. *Travaux de l'Institut Géographique de Reims*, 27 (1), 3-14. DOI : 10.3406/tigr.1976.1018.

WORONOFF D. (1989) – *Révolution et espaces forestiers*. L'Harmattan, Paris, 264 p.

WU Q., LANE C. R. (2017) – Delineating wetland catchments and modeling hydrologic connectivity using lidar data and aerial imagery. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21 (7), 3579-3595. DOI : 10.5194/hess-21-3579-2017.

YAN W. Y., SHAKER A., EL-ASHMAWY N. (2015) – Urban land cover classification using airborne LiDAR data: A review. *Remote Sensing of Environment*, 158, 295-310. DOI : 10.1016/j.rse.2014.11.001.

YILMAZ A. (2022) – Engineering properties of basalt aggregates in terms of use in granular layers of flexible pavements. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01182. DOI : 10.1016/j.cscm.2022.e01182.

YOËLI P. (1965) – Analytical hill shading. *Surveying and Mapping*, 25 (4), 573-579.

ZAKŠEK K., OŠTIR K., KOKALJ Ž. (2011) – Sky-View Factor as a Relief Visualization Technique. *Remote Sensing*, 3 (2), 398-415. DOI : 10.3390/rs3020398.

ZALEWSKA A. I., KIARSZYS G. (2021) – The forgotten Eastern Front: dealing with the social and archaeological legacies of the Battle of the Rawka and Bzura Rivers (1914-1915), Central Poland. *Antiquity*, 95 (384), 1565-1583. DOI : https://doi.org/10.15184/aqy.2021.134.

TABLE DES ANNEXES

Annexe 1 : Fort de Loqueltas ou Locqueltas. 599
Annexe 2 : Camp retranché de Paris en 1914. 599
Annexe 3 : Fortifications successives du château de Joux (Jura). 600
Annexe 4 : Type de tirs de l'artillerie des attaquants théoriques d'un fort Séré de Rivières. 600
Annexe 5 : Marché de gré à gré réalisé pour la construction du pavillon du casernier du fort de Vaujours (place de Vincennes). 601
Annexe 6 : Décret relatif aux occupations temporaires du 8 février 1868. 602
Annexe 7 : Taux normaux de salaires et durée du travail dans les marchés de l'État. 603
Annexe 8 : Perception de la géologie et de la topographie du Bassin parisien à la fin du XIXe siècle. 603
Annexe 9 : Formations superficielles périglaciaires sur craie de Champagne - grèzes crayeuses, cryoturbation et sols striés. 604
Annexe 10 : Schéma de l'organisation macromorphologique des Argiles à Meulières dans un profil d'altération des calcaires de la Montagne de Reims. 604
Annexe 11 : Schéma du modèle de pluviomètre à cadran utilisé au sein du fort de la Vigie de Berru. 605
Annexe 12 : Croquis compris dans une notice explicative réalisée par Jules Rouby, promoteur et le diffuseur de la source artificielle. 605
Annexe 13 : Répartition statistique des catégories forestières de la BD Forêt v2 de l'IGN dans le Pays rémois et les grands camps militaires du nord de la Champagne. 606
Annexe 14 : Principales unités géographiques et voies antiques des environs de Reims. 608
Annexe 15 : Plan détaillé du village de Cernay -les-Reims réalisé en 1782 par Dominique Villain. 609
Annexe 16 : Les différentes configurations du saltus. 609
Annexe 17 : Évolution de l'occupation du sol de la commune de Trépail aux XVIIIe et XIXe siècles. 610
Annexe 18 : Surface forestière à la fin des années 1820 d'après la carte d'État-Major. 610
Annexe 19 : Occupation du sol sur la butte du fort de Nogent-l'Abbesse d'après le cadastre napoléonien. 611
Annexe 20 : Ensemble documentaire diachronique du château de Toussicourt. 612
Annexe 21 : Plan général et détaillé de la montagne de Saint-Thierry dressé en 1777 par Pierre Villain. 613
Annexe 22 : Réseaux terrestres et fluviaux des environs de Reims. 614
Annexe 23 : Projet de place forte pour Reims élaboré par le Comité des fortifications (1843). 615
Annexe 24 : Caractéristiques du projet de place forte de Reims de 1843. 616
Annexe 25 : Diagramme d'orientation des azimuts géographiques des forts Séré de Rivières de Reims. 616
Annexe 26 : Extrait du jugement d'expropriation du 27 août 1875 réalisé en vue de la construction des ouvrages des buttes de Berru et Brimont. 617
Annexe 27 : Quittance d'indemnité d'occupation temporaire délivrée à un propriétaire à l'issue de l'occupation des terrains par l'entreprise Lancesseur chargée de la construction des ouvrages du Mont de Berru. 618
Annexe 28 : Evolution de la population des communes situées à proximité d'un ouvrage fortifié. 619
Annexe 29 : Deux monnaies de nécessité éditées au service des entreprises de construction des forts de Berru et Brimont. 620
Annexe 30 : Proposition de reconstitution des zones concentriques de servitude. 620
Annexe 31 : Armement de la place forte dans la première moitié des années 1880 pour le fort de la Pompelle. 621
Annexe 32 : Armement de la place forte à la date du 28 mai 1890. 621
Annexe 33 : Évolution schématique de la ligne de front pendant la Première Guerre mondiale dans le secteur de Reims. 622

Annexe 34 : Incendie de la cathédrale de Reims après le bombardement allemand du 19 septembre 1914 réalisé depuis les hauteurs de la butte de Berru. 623
Annexe 35 : Extrait du cadre de classement des archives du SHD mis en ligne. 623
Annexe 36 : Extrait du plan de la portion de route de Reims à Rethel passant par Witry-lès-Reims issu de l'Atlas de Trudaine pour la généralité de Châlons. 624
Annexe 37 : Légende des travaux de défense français et allemands. 625
Annexe 38 : Inventaire des photographies aériennes disponibles entre 1935 et 2013 sur le site Remonter le temps pour chaque fortification de la ceinture fortifiée Séré de Rivières de Reims. 626
Annexe 39 : Description des objets associés à chaque classe de points LiDAR. 627
Annexe 40 : Protocole de calcul de la densité de points LiDAR au sol à partir d'un jeu de données LAS. 627
Annexe 41 : Procédure de contrôle et de correction de la classification des points « sol » sous Cloud Compare. 628
Annexe 42 : Exemple d'évaluation qualitative empirique des différentes techniques de visualisation par rapport au type de structure archéologique. 629
Annexe 43 : Les trois régions principales de la vision. 630
Annexe 44 : Résultat d'une enquête sur les préférences d'opérateurs expérimentés de certaines méthodes de visualisation. 630
Annexe 45 : Distribution des divers traitements de visualisation utilisés par des opérateurs plus ou moins aguerris en fonction du type de structure identifié 631
Annexe 46 : Revêtement d'escarpe avec arceaux en décharge de profil et de face. 631
Annexe 47 : Escalier reliant l'une des caponnières du fort de Montbré au chemin des rondes. 632
Annexe 48 : Croquis perspective de caves à canon ou casemates à tir indirect. 632
Annexe 49 : Synthèse de l'analyse spatiale des polémo-formes du massif de Brimont à partir du traitement automatique de l'image Lidar. 633
Annexe 50 : Évolution de la ligne de front sur les plateaux de formations cénozoïques après la reprise de la guerre de mouvement au printemps 1918. 634
Annexe 51 : Localisation des terrières d'après les cadastres napoléoniens et les états de section associés. 635
Annexe 52 : Relevé de façade d'une portion du mur de contrescarpe du fort de la Pompelle. 636
Annexe 53 : Roche basaltique détectée au fort de Saint-Thierry. 636
Annexe 54 : Cartographie diachronique des réseaux de tranchées allemandes entre avril 1915 et avril 1918 implantés dans le massif forestier de la butte de Brimont et linéaires et volumes associés. 637
Annexe 56 : Exemples d'utilisation de voies ferrées étroites au sein des forts de Reims. 639
Annexe 57 : Carte des forts dans les réseaux de défense de la Première Guerre mondiale 640
Annexe 58 : Tunnel creusé dans la craie campanienne par les Allemands sous le fort de Nogent-l'Abbesse. 641
Annexe 59 : Extrait d'un modèle 3D de galeries souterraines du fort de Nogent-l'Abbesse réalisé à partir d'une acquisition LiDAR topographique. 642
Annexe 60 : *Stellungskarte* du secteur de Puisieulx, réalisé d'après des déclarations de prisonniers, représentant le tunnel « métro » desservant le fort. 642
Annexe 61 : Réseau de voies ferrées et d'épis de tir utilisé par l'ALVF dans le secteur de Reims. 643
Annexe 62 : Relevé botanique itinérant réalisé au fort de Brimont avec la collaboration de Philippe Laporte. 644
Annexe 63 : Cartographie des habitats naturels du site NATURA 2000 Directive Habitats « Pelouses du Fort de Saint-Thierry, de Chenay et de Merfy ». 646
Annexe 64 : Coupe géologique de la butte du fort de Nogent-l'Abbesse réalisée par Jean-Michel Durlet, ingénieur hydrogéologue, membre de l'Association des Amis du Fort de Nogent-l'Abbesse. 647
Annexe 65 : Fort de Douaumont, trou d'obus de 400 mm. 648

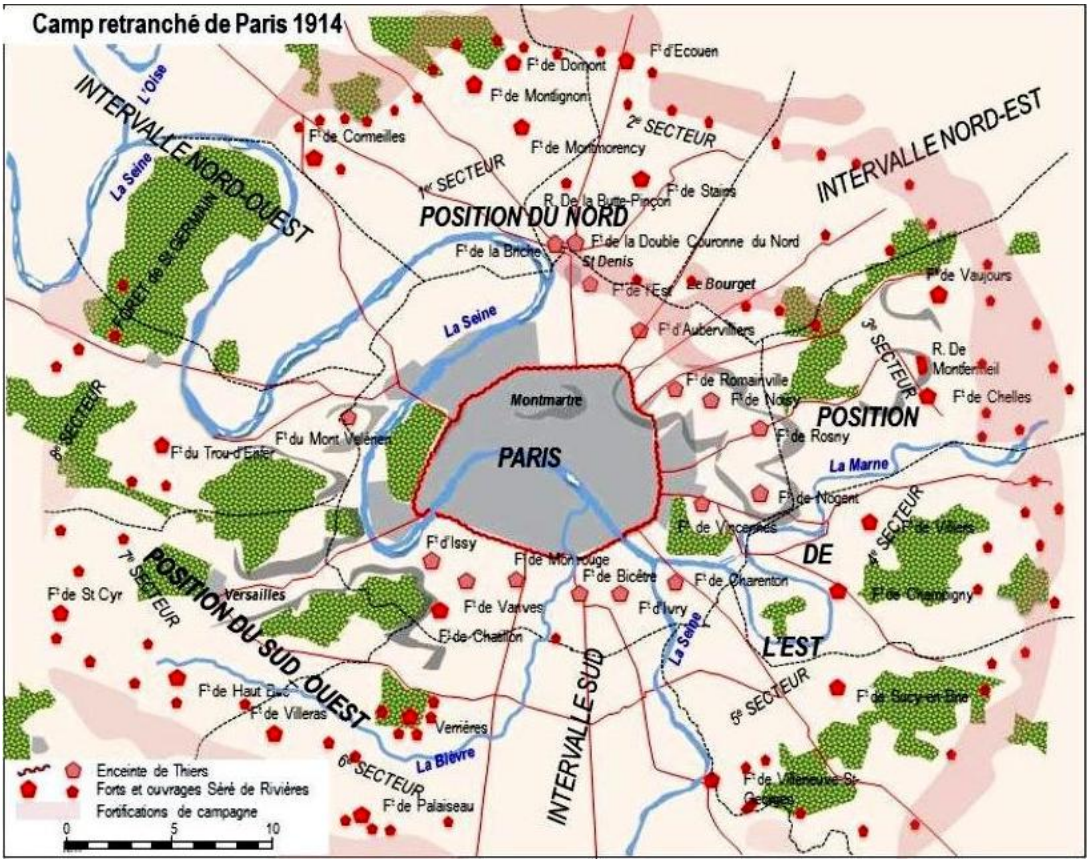
Annexe 66 : Le glissement vers de nouveaux propriétaires à la fin des années 1990..... 648
Annexe 67 : Panneau explicatif du parcours d'orientation du fort de Mont-en-Barœul (place de Lille).. 649
Annexe 68 : Double ceinture de forts permanents au sein du camp retranché de Paris. 650
Annexe 69 : Forts de la première tranche Séré de Rivières protégés au titre des monuments historiques. 651
Annexe 70 : Exemple de structure de table attributaire destinée à alimenter une base de données d'inventaire des fortifications étudiées..... 651
Annexe 71 : Exemple de Feste allemands de la même génération que les forts Séré de Rivières de type 1874. 651

ANNEXES

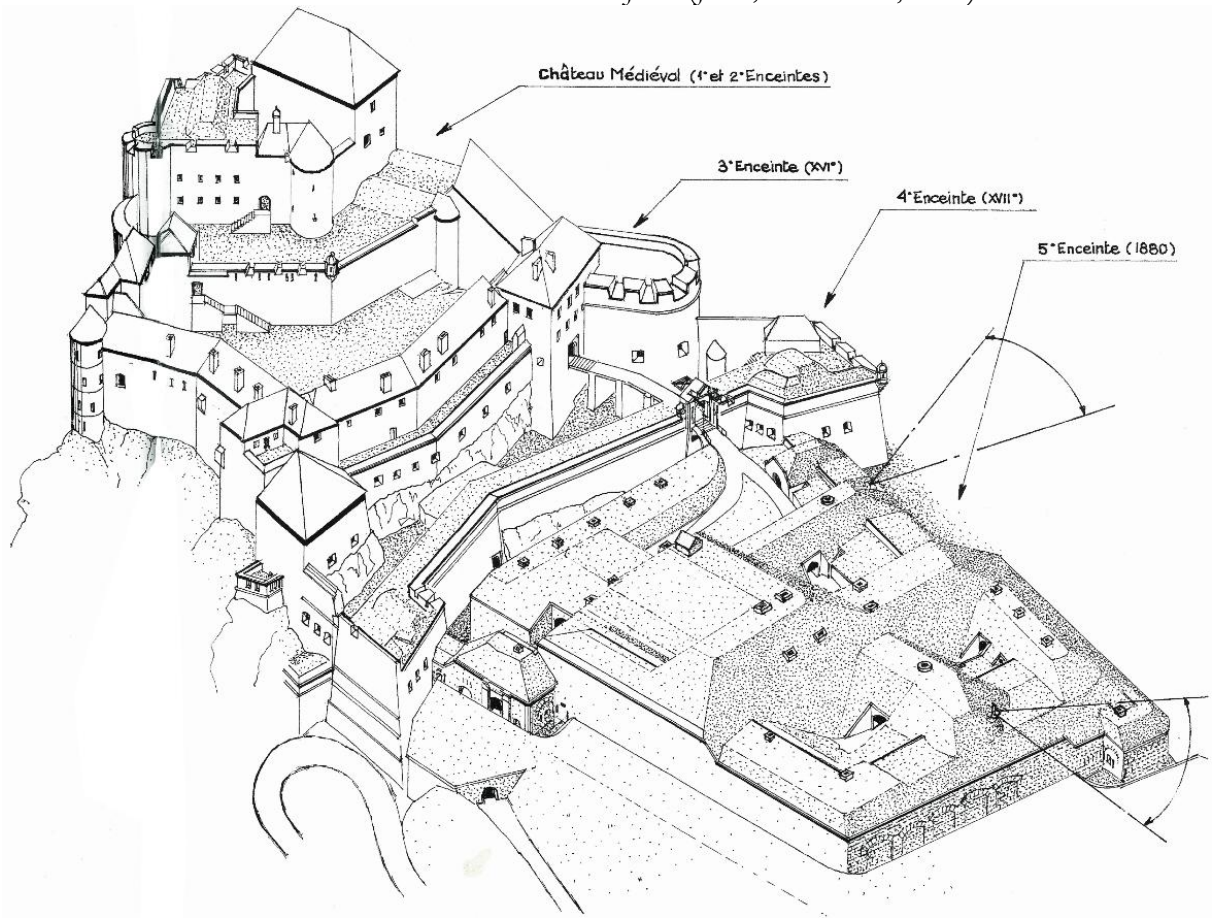
Annexe 1 : Fort de Loqueltas ou Locqueltas (cl : Guillaume Lécuillier, Inventaire général, ADAGP).



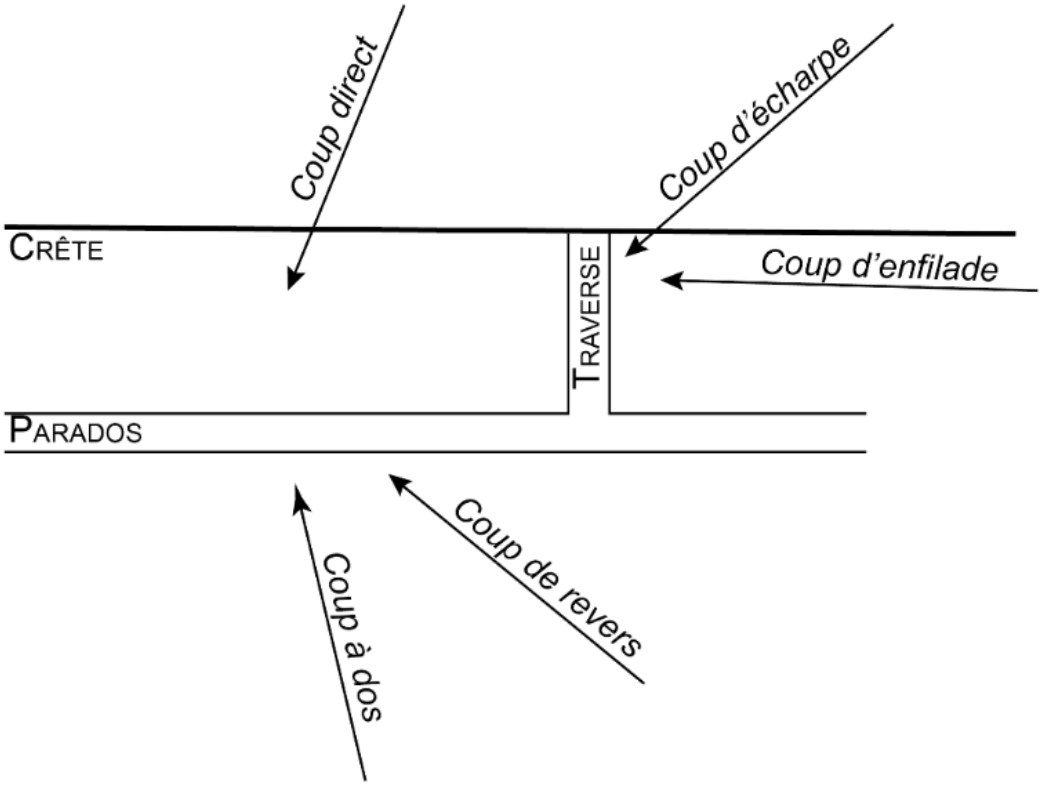
Annexe 2 : Camp retranché de Paris en 1914 (Musée du Génie, sd.c).



Annexe 3 : Fortifications successives du château de Joux (Jura ; Truttmann, 2017).



Annexe 4 : Type de tirs de l'artillerie des attaquants théoriques d'un fort Séré de Rivières (d'après Simoutre, 1889).



Annexe 5 : Marché de gré à gré réalisé pour la construction du pavillon du casernier du fort de Vaujours (place de Vincennes ; archives personnelle).

1/ exemplaire

Génie

Direction de Paris

Place de Vincennes

Marché de gré à gré pour travaux de maçonnerie, Pavage, Fumisterie et transports à exécuter pour construire le pavillon du Casernier du fort de Vaujours.

(application de § 1er de l'article 18 du décret du 18 Novembre 1882).

L'an mil huit cent quatre-vingt-quatre, le quinze avril, entre :

M. Rothmann, Chef de Bataillon Chef du Génie à Vincennes, d'une part, et

M. Guéruel, Honoré, entrepreneur, demeurant à Vaujours. (Seine-Galerie), d'autre part, il a été convenu et arrêté ce qui suit :

Article 1er

Par le présent marché, qui prendra fin au plus tard le trente-et-un Xbre 1884, le sieur Guéruel s'engage à exécuter aux prix suivants les travaux ci-dessous indiqués pour la construction d'un pavillon destiné au logement du casernier du fort de Vaujours.

Numéros du bordereau	Énoncé des ouvrages	Valeur de l'unité	Prix
	Maçonnerie		
1	Journée de tailleur de pierre, poseur, cimenteur	la journée	10f,00
2	— id — de maçon, contre-poseur, carreleur, briqueteur	— id —	8,50
3	— id — de aide-maçon, aide-limousin, aide carreleur, aide cimenteur	— id —	5,00
4	Boisseaux Gourdier rectangulaires de 0m,33 de hauteur et de 0m,03 d'épaisseur pour tuyaux de cheminée de 0m,27 sur 0m,22	le cent	105,00
5	Maçonnerie de béton composé de 1 vol. de chaux hydraulique, 3 vol. de sable et de 5 de cailloux, la pierre cassée fournie par l'Etat	le Mètre Cube	15,00
6	Maçonnerie de meulière caillasse du plateau de Vaujours, avec mortier N°2 de chaux hydraulique (1 vol. de chaux, 2 de sable), et sable de carrière pour murs de moins de 0m,50 d'épaisseur	— id —	25,00
7	Maçonnerie de moellons durs de Lizy, avec mortier N°1 de chaux hydraulique (1 vol. de chaux, 3 de sable)	— id —	32,25
8	Maçonnerie de pierre de taille à l'Etat, avec mortier N°1 de chaux hydraulique sans retaille de lits et joints	— id —	12,50
9	Plus-value pour voûtes en pierre de taille à l'Etat	— id —	7,85
10	Plus-value par mètre carré de parements vus de douelles de voûtes, pour frais de cintrage compris les bois, cintres, coulis, pour les voûtes en pierre de taille moellons de toutes espèces, meulière et grais, de 5m,00 de portée et au dessous	le Mètre carré	2,40

Annexe 6 : Décret relatif aux occupations temporaires du 8 février 1868 (AD51, 2 U 733).

DÉCRET

Qui détermine les formes à suivre pour les occupations temporaires des terrains nécessaires à l'exécution des travaux publics.

NAPOLÉON, par la grâce de Dieu et la volonté nationale, Empereur des Français,

A tous présents et à venir, salut.

Sur la proposition de notre ministre de l'agriculture, du commerce et des travaux publics :

Vu les arrêts du Conseil, des 7 septembre 1755 et 20 mars 1780 ;

Vu la loi des 28 septembre, 6 octobre 1791 ;

Vu la loi du 28 pluviôse an VIII, sur les attributions des conseils de préfecture ;

Vu les articles 55 et 56 de la loi du 16 septembre 1807 ;

Vu l'avis du conseil général des ponts et chaussés,

La section de l'agriculture, du commerce, des travaux publics et des beaux-arts de notre Conseil d'État entendue,

AVONS DÉCRÉTÉ ET DÉCRÉTONS ce qui suit :

ARTICLE PREMIER. Lorsqu'il y a lieu d'occuper temporairement un terrain, soit pour y extraire des terres ou des matériaux, soit pour tout autre objet relatif à l'exécution des travaux publics, cette occupation est autorisée par un arrêté du préfet, indiquant le nom de la commune où le terrain est situé, les numéros que les parcelles dont il se compose portent sur le plan cadastral et le nom du propriétaire.

Cet arrêté vise le devis qui désigne le terrain à occuper, ou le rapport par lequel l'ingénieur en chef chargé de la direction des travaux propose l'occupation.

Un exemplaire du présent règlement est annexé à l'arrêté.

ART. 2. Le Préfet envoie ampliation de son arrêté à l'ingénieur en chef et au maire de la commune. L'ingénieur en chef en remet une copie certifiée à l'entrepreneur, le maire notifie l'arrêté au propriétaire du terrain ou à son représentant.

ART. 3. En cas d'arrangement à l'amiable entre le propriétaire et l'entrepreneur, ce dernier est tenu de présenter aux ingénieurs, toutes les fois qu'il en est requis, le consentement écrit du propriétaire ou le traité qu'il a fait avec lui.

ART. 4. A défaut de convention amiable, l'entrepreneur, préalablement à toute occupation du terrain désigné, fait au propriétaire, ou, s'il ne demeure pas dans la commune, à son fermier, locataire ou gérant, une notification par lettre chargée indiquant le jour où il compte se rendre sur les lieux ou s'y faire représenter. Il l'invite à désigner un expert pour procéder, contradictoirement avec celui qu'il aura lui-même choisi, à la constatation de l'état des lieux.

En même temps, l'entrepreneur informe par écrit le maire de la commune de la notification faite par lui au propriétaire.

Entre cette notification et la visite des lieux, il doit y avoir un intervalle de dix jours au moins.

ART. 5. Au jour fixé, les deux experts procèdent ensemble à leurs opérations contradictoires. Ils s'attachent à constater l'état des lieux, de manière qu'en rapprochant plus tard cette constatation de celle qui sera faite après l'exécution des travaux, on ait les éléments nécessaires pour évaluer la dépréciation du terrain ou faire l'estimation des dommages. Ils font eux-mêmes cette estimation si l'entrepreneur et le propriétaire y consentent.

Ils dresseront leur procès-verbal en trois expéditions, dont l'une est remise au propriétaire du terrain, une autre à l'entrepreneur, et la troisième au maire de la commune.

ART. 6. Si, dans le délai fixé par le dernier paragraphe de l'article 4, le propriétaire refuse ou néglige de nommer son expert, le maire en désigne un d'office, pour opérer contradictoirement avec l'expert de l'entrepreneur.

ART. 7. Immédiatement après les constatations prescrites par les articles précédents, l'entrepreneur peut occuper le terrain et y commencer les travaux autorisés par l'arrêté du préfet, tous les droits du propriétaire étant réservés en ce qui concerne le règlement de l'indemnité.

Toutefois, s'il existe sur ce terrain des arbres fruitiers ou de haute futaie qu'il soit nécessaire d'abattre, l'entrepreneur est tenu de les laisser subsister jusqu'à ce que l'estimation en ait été faite dans les formes voulues par la loi.

En cas d'opposition de la part du propriétaire, l'occupation a lieu avec l'assistance du maire ou de son délégué.

ART. 8. Après l'achèvement des travaux et, s'ils doivent durer plusieurs années, à la fin de chaque campagne, il est fait une nouvelle constatation de l'état des lieux.

A défaut d'accord entre l'entrepreneur et le propriétaire pour l'évaluation partielle ou totale de l'indemnité, il est procédé conformément à l'article 56 de la loi du 16 septembre 1807.

ART. 9. Lorsque les travaux sont exécutés directement par l'administration, sans l'intermédiaire d'un entrepreneur, il est procédé comme il a été dit ci-dessus ; mais alors la notification prescrite dans l'article 4 est faite par les soins de l'ingénieur, et l'expert chargé de constater l'état des lieux contradictoirement avec celui du propriétaire, est nommé par le préfet.

ART. 10. Notre ministre de l'agriculture, du commerce et des travaux publics est chargé de l'exécution du présent décret.

Fait au palais des Tuileries, le 8 février 1868.

NAPOLÉON.

Par l'Empereur :

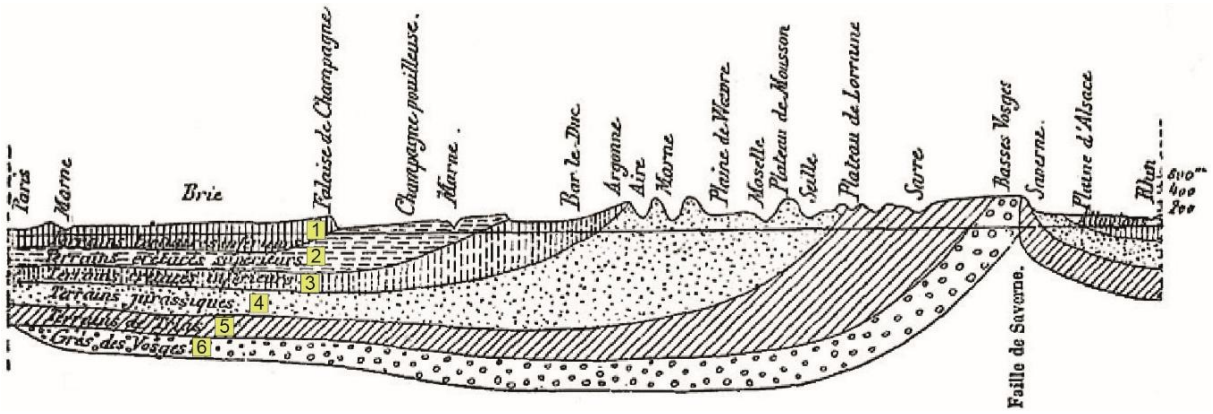
Le Ministre de l'Agriculture, du Commerce et des Travaux publics,

DE FORCADE.

Annexe 7 : Taux normaux de salaires et durée du travail dans les marchés de l'État (Territoire de Belfort, 1911). Reconstitution d'après un bordereau administratif du 11 décembre 1911 (Fouqueray, 2003).

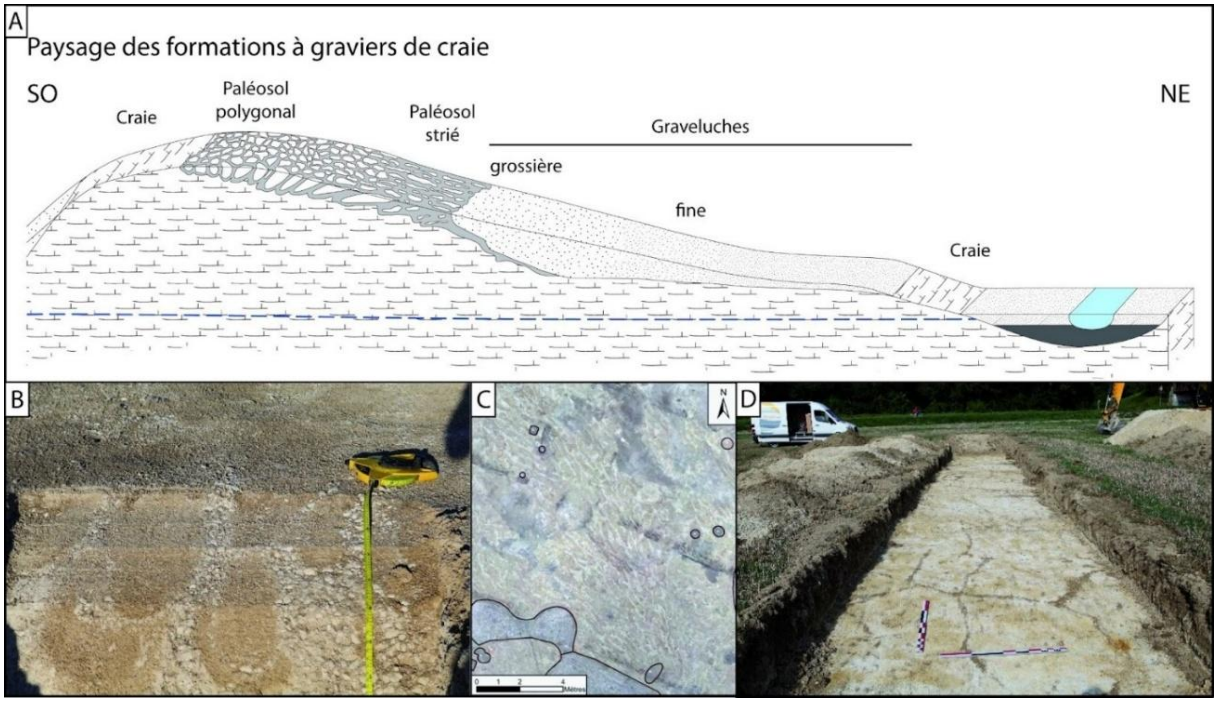
Profession	Prix de l'heure	Profession	Prix de l'heure
Tailleur de pierres	0,7	Zingueur	0,5
Applicateur de ciment	0,65	Plombier	0,5
Asphalteur	0,65	Scieur de long	0,5
Plâtrier	0,65	Carrier	0,45
Chef maçon	0,8	Roctier	0,45
Maçon poseur	0,65	Talutier	0,45
Maçon	0,58	Aide charpentier	0,45
Paveur	0,58	Mineur	0,45
Couvreur	0,58	Terrassier	0,45
Charpentier	0,58	Aide asphalteur ou chauffeur	0,45
Menuisier	0,58	Manœuvre	0,4
Carreleur	0,58	Aide maçon	0,4
Fontainier	0,58	Aide paveur	0,4
Pompier	0,58	Gâcheur	0,4
Serrurier	0,5	Bûcheron	0,4
Ferblantier	0,5	Charretier	0,4
Vitrier	0,5	Démolisseur	0,4
Peintre	0,5	Casseur de pierres	0,4
Forgeron	0,5	Petit manœuvre (- 18 ans)	0,3
Puisatier	0,5	Apprenti ouvrier (-18 ans)	0,3

Annexe 8 : Perception de la géologie et de la topographie du Bassin parisien à la fin du XIXe siècle (d'après Marga, 1885).

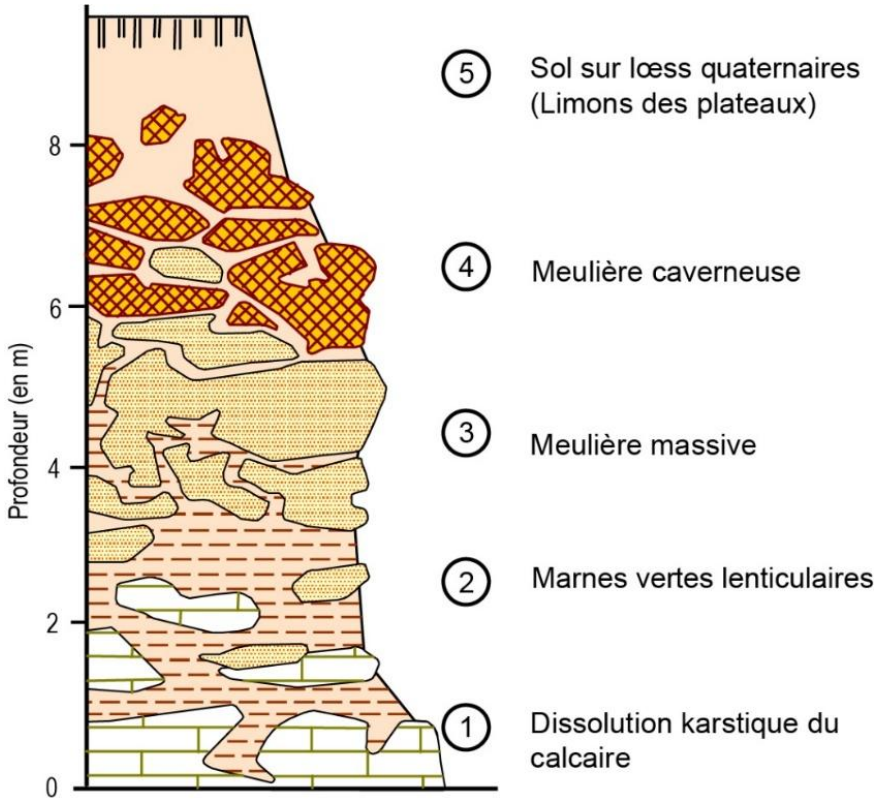


Les cuestas y sont représentées comme des bourrelets topographiques difficilement franchissables. 1 : Terrains tertiaires inférieurs ; 2 : Terrains crétacés supérieurs ; 3 : Terrains crétacés inférieurs ; 4 : Terrains jurassiques ; 5 : Terrains du Trias ; 6 : Grès des Vosges.

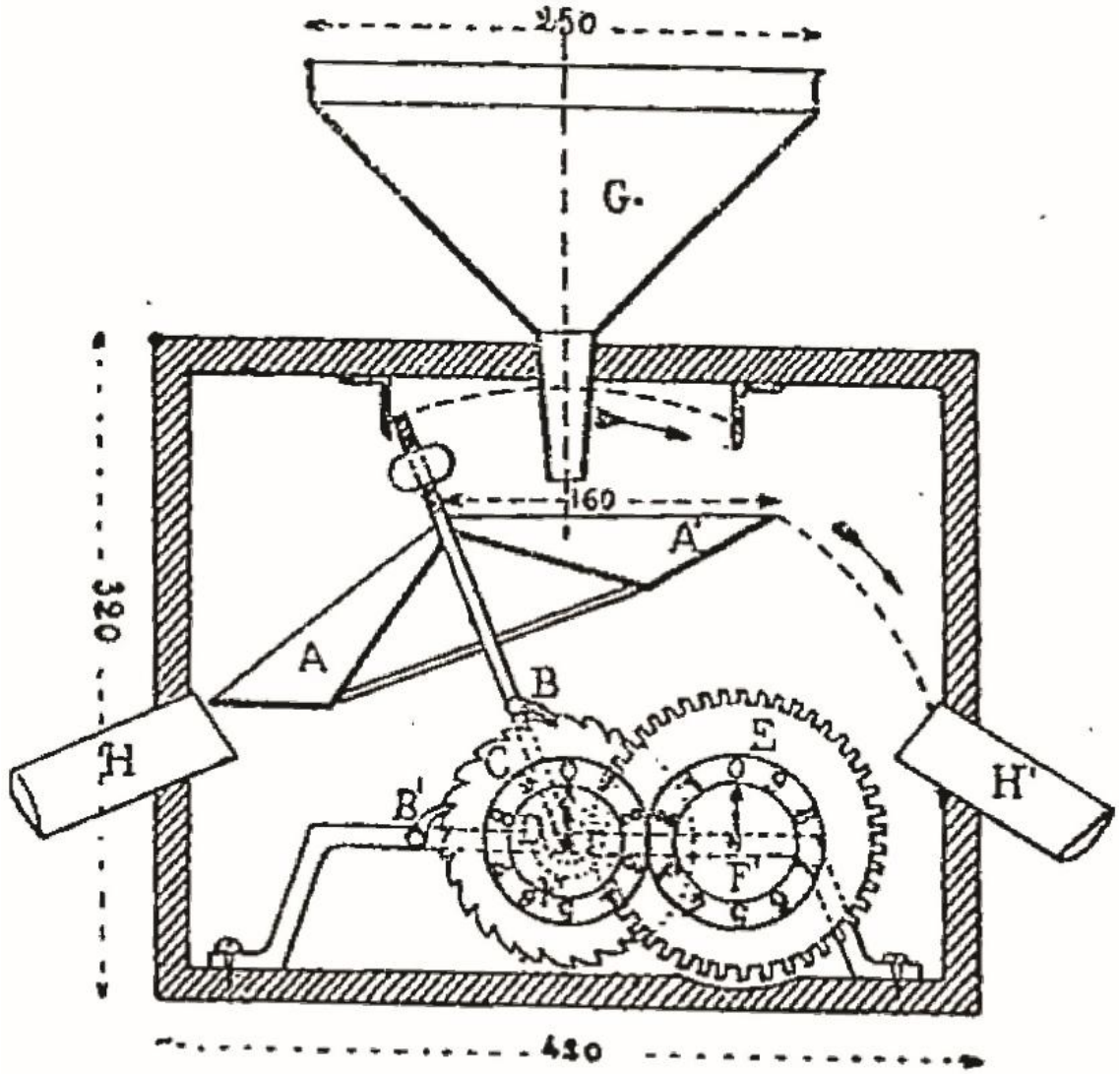
Annexe 9 : Formations superficielles périglaciaires sur craie de Champagne - grèzes crayeuses (« graveluche »), cryoturbation et sols striés (Taborelli, 2018). A : Bloc diagramme des paysages à graviers de craie (d'après Laurain, 1995) ; B : Photographie de poche de cryoturbation (cl : Pierre Taborelli) ; C : Sol strié en vue drone ; D : Sol strié par des réseaux de fentes de gel en diagnostic archéologique (Puisieulx ; cl : Alain Devos).



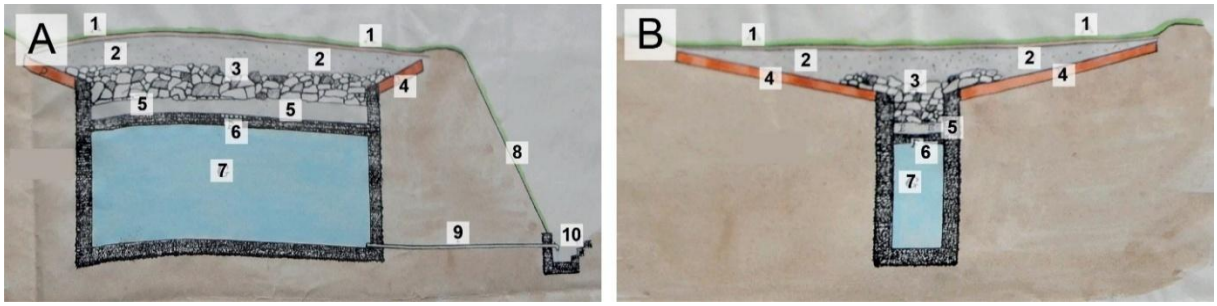
Annexe 10 : Schéma de l'organisation macromorphologique des Argiles à Meulières dans un profil d'altération des calcaires de la Montagne de Reims (d'après Thiry, 2007).



Annexe 11 : Schéma du modèle de pluviomètre à cadran utilisé au sein du fort de la Vigie de Berru (Houdaille, 1889).

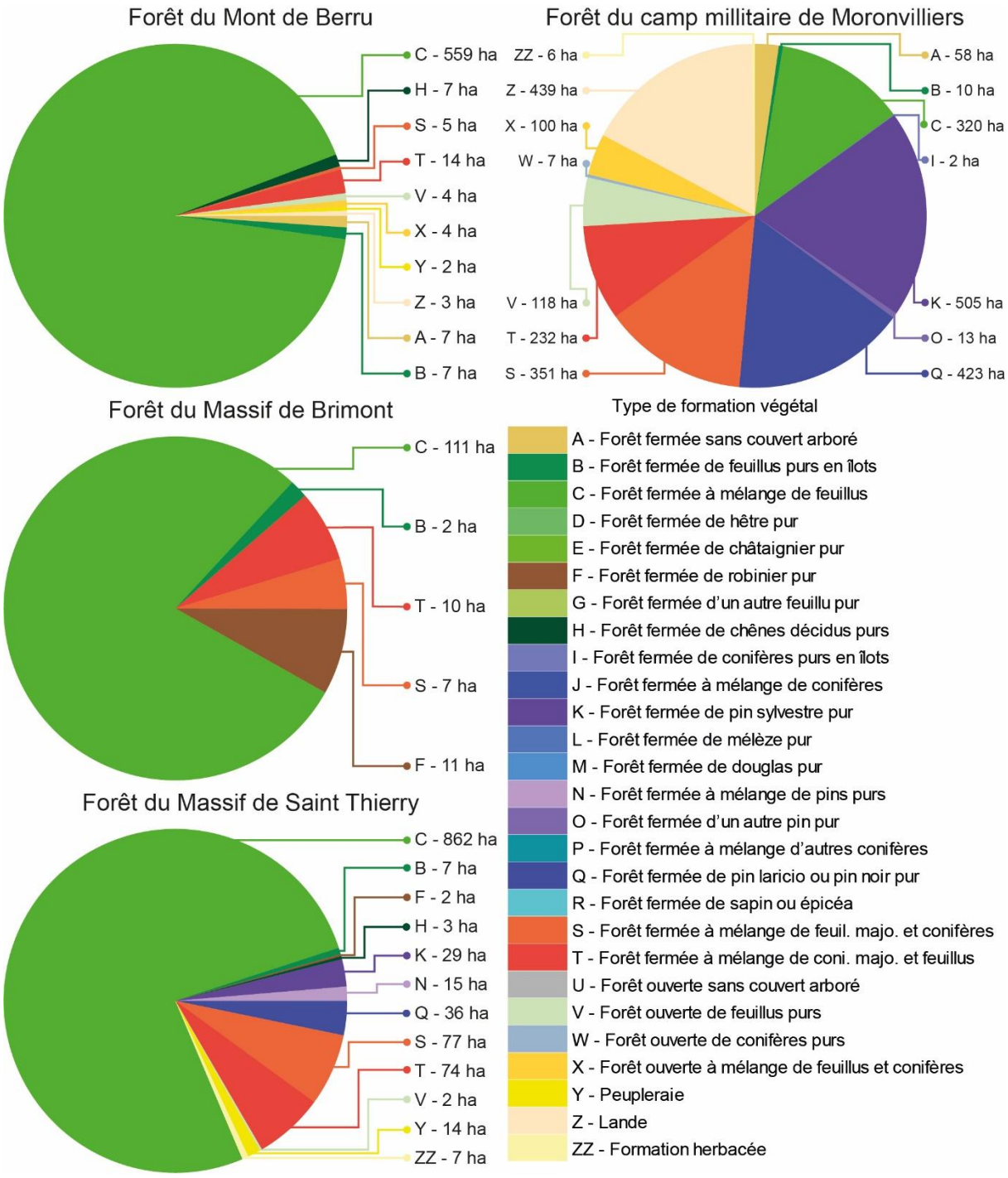


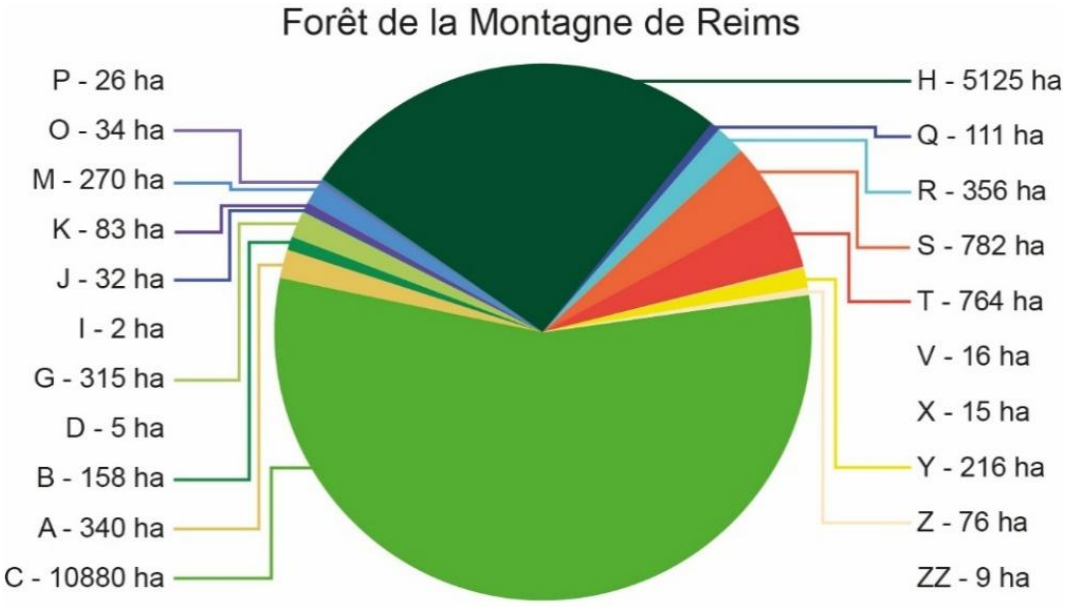
Annexe 12 : Croquis compris dans une notice explicative réalisée par Jules Rouby, promoteur et le diffuseur de la source artificielle (Garnier, 2017) ; A : Vue de côté ; B : Vue de face.

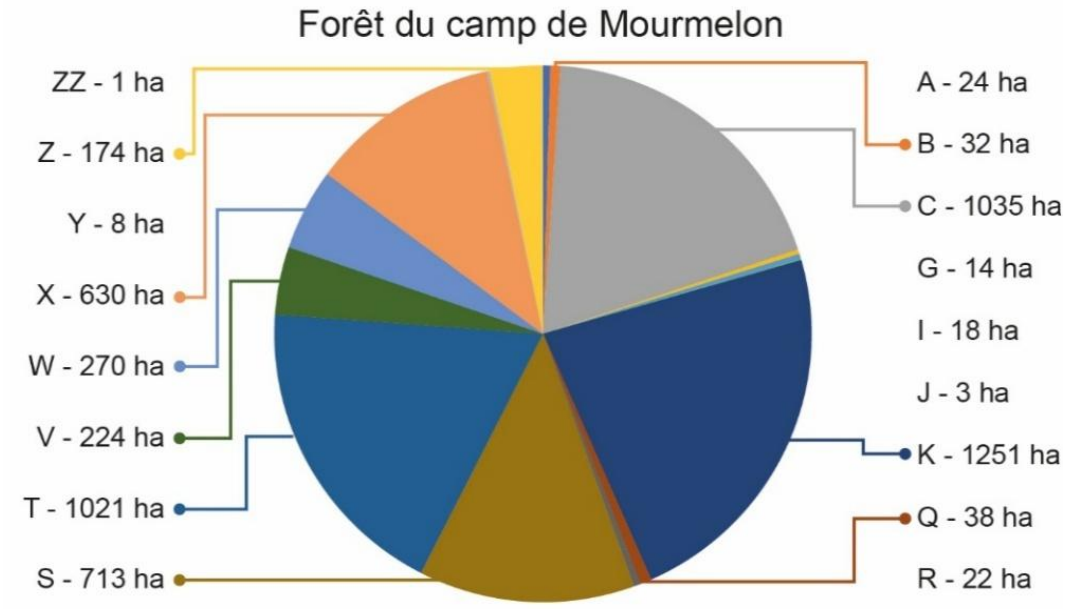


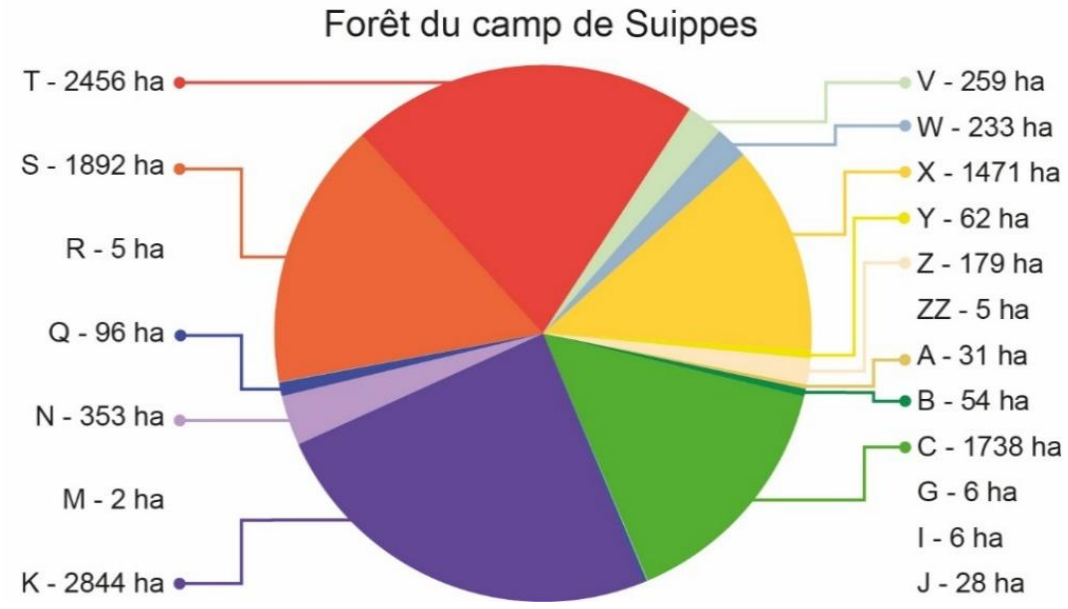
1 : Gazon sur mince couche de terre composée de 1/4 de glaise et de 3/4 de sable ; 2 : Sable et cailloux ; 3 : Craie et fer mélangés ; 4 : Lame d'argile pilonnée ; 5 : Sable fin ; 6 : Ouverture de la voûte fermée par des barreaux de fer juxtaposés ; 7 : Réservoir souterrain en maçonnerie hydraulique ; 8 : Talus gazonné ; 9 : Tuyau d'écoulement ; 10 : Escalier de la fontaine.

Annexe 13 : Répartition statistique des catégories forestières de la BD Forêt v2 de l'IGN dans le Pays rémois et les grands camps militaires du nord de la Champagne (fig. 3.18A-H).

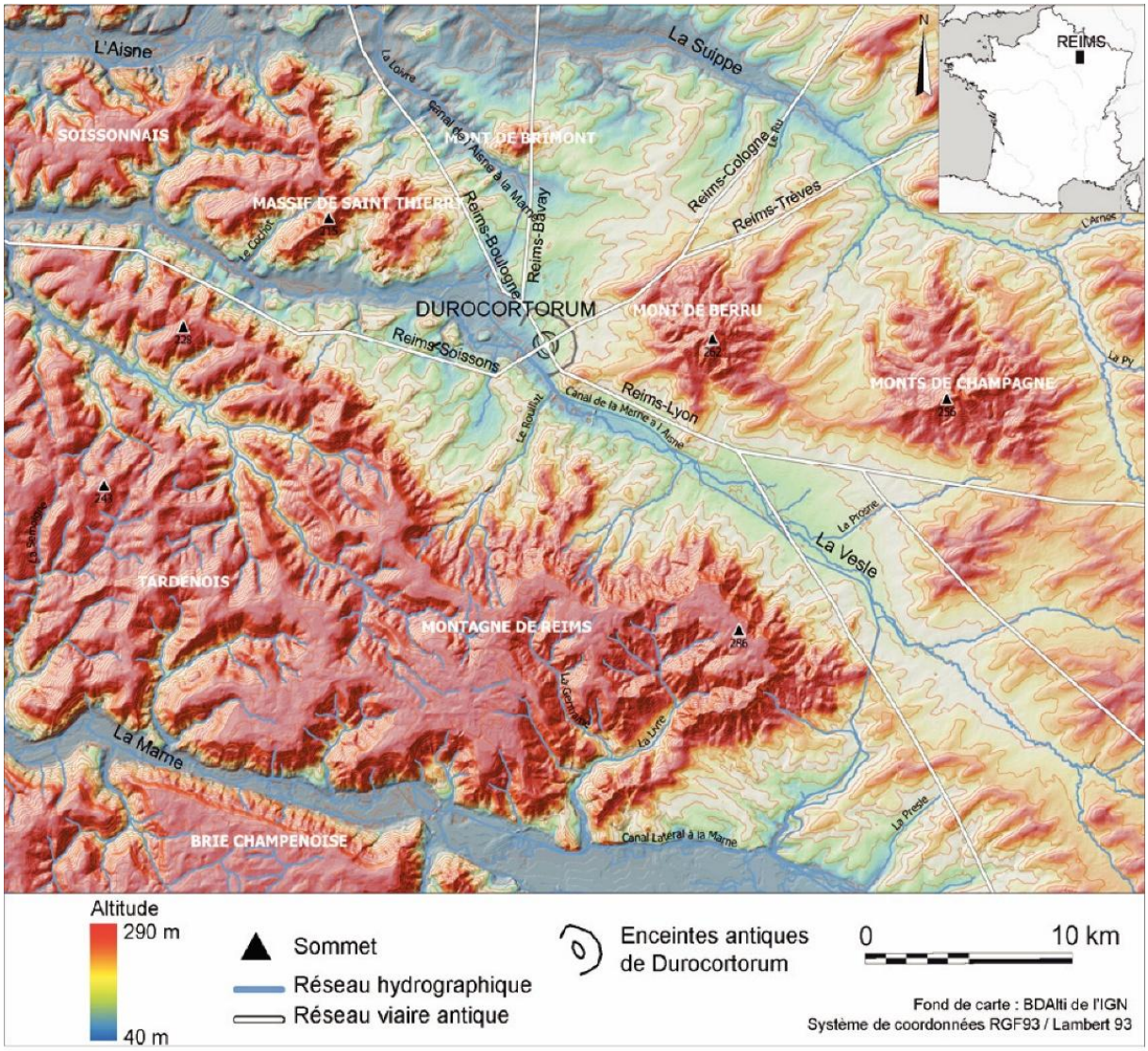



Forêt de la Montagne de Reims
P - 26 ha
O - 34 ha
M - 270 ha
K - 83 ha
J - 32 ha
I - 2 ha
G - 315 ha
D - 5 ha
B - 158 ha
A - 340 ha
C - 10880 ha
H - 5125 ha
Q - 111 ha
R - 356 ha
S - 782 ha
T - 764 ha
V - 16 ha
X - 15 ha
Y - 216 ha
Z - 76 ha
ZZ - 9 ha

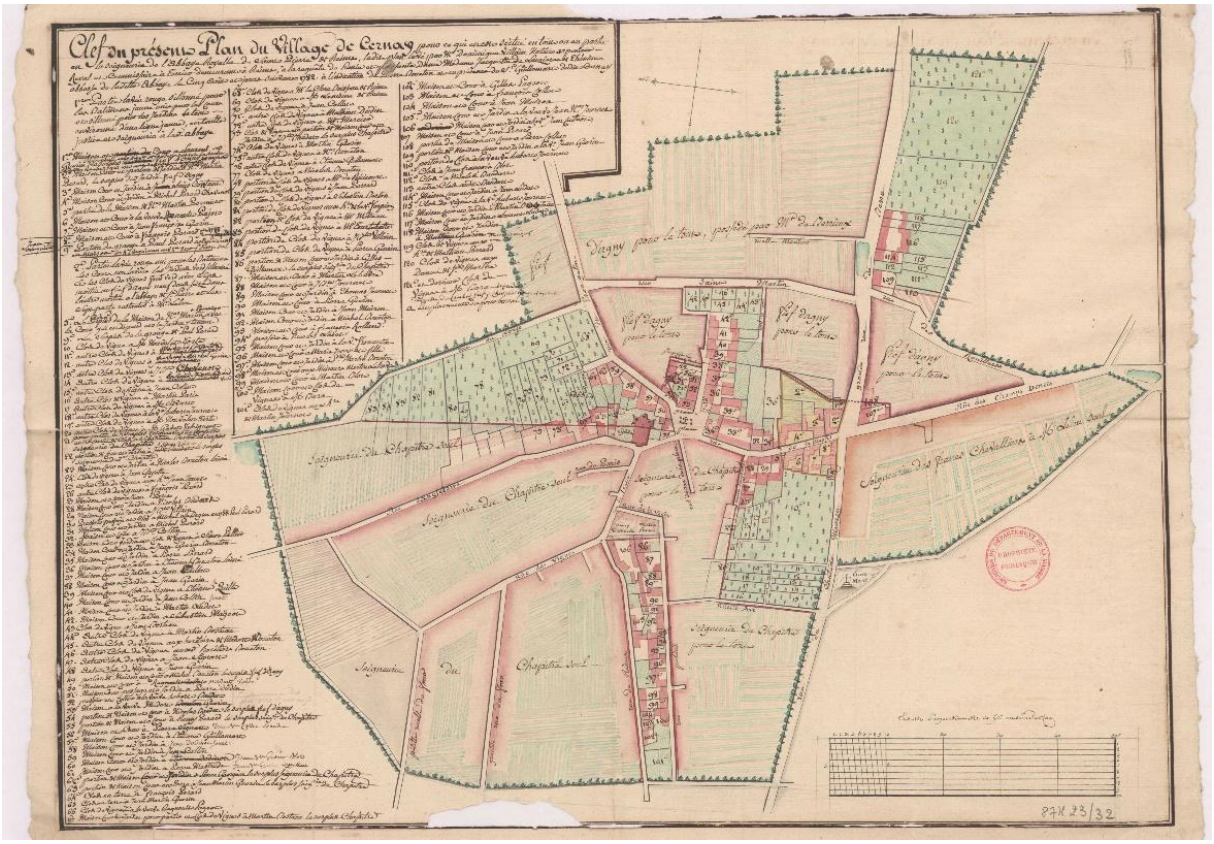

Forêt du camp de Mourmelon
ZZ - 1 ha
Z - 174 ha
Y - 8 ha
X - 630 ha
W - 270 ha
V - 224 ha
T - 1021 ha
S - 713 ha
A - 24 ha
B - 32 ha
C - 1035 ha
G - 14 ha
I - 18 ha
J - 3 ha
K - 1251 ha
Q - 38 ha
R - 22 ha


Forêt du camp de Suippes
T - 2456 ha
S - 1892 ha
R - 5 ha
Q - 96 ha
N - 353 ha
M - 2 ha
K - 2844 ha
V - 259 ha
W - 233 ha
X - 1471 ha
Y - 62 ha
Z - 179 ha
ZZ - 5 ha
A - 31 ha
B - 54 ha
C - 1738 ha
G - 6 ha
I - 6 ha
J - 28 ha

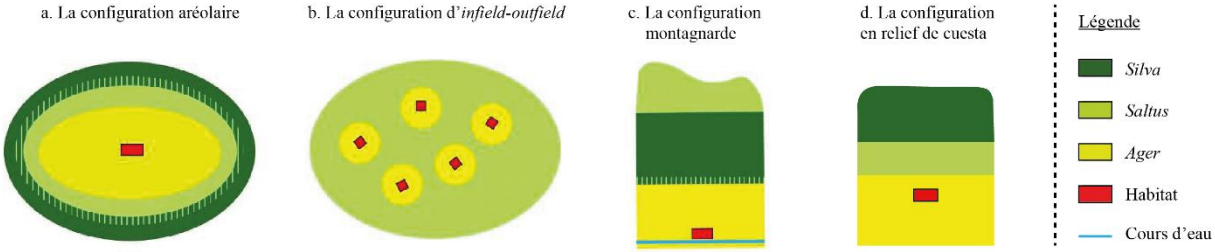
Annexe 14 : Principales unités géographiques et voies antiques des environs de Reims (Laratte, 2022b ; modifié d'après Pichard 2014).



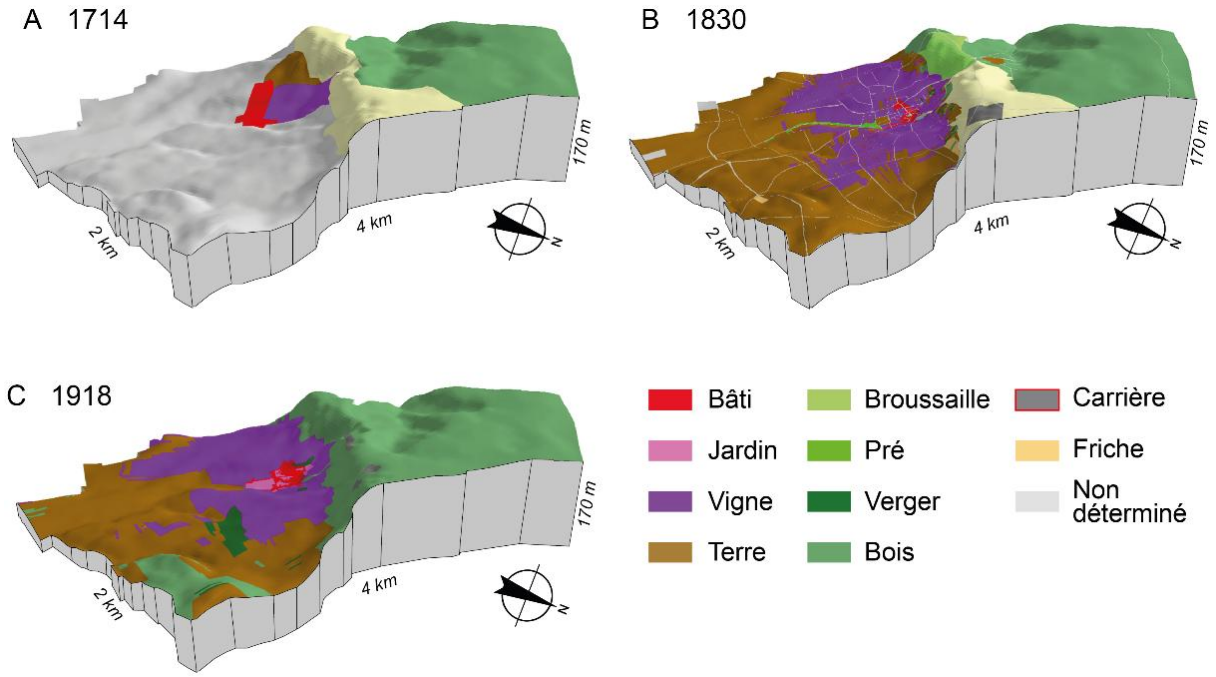
Annexe 15 : Plan détaillé du village de Cernay -les-Reims réalisé en 1782 par Dominique Villain (AD51, 87 H 23/32).



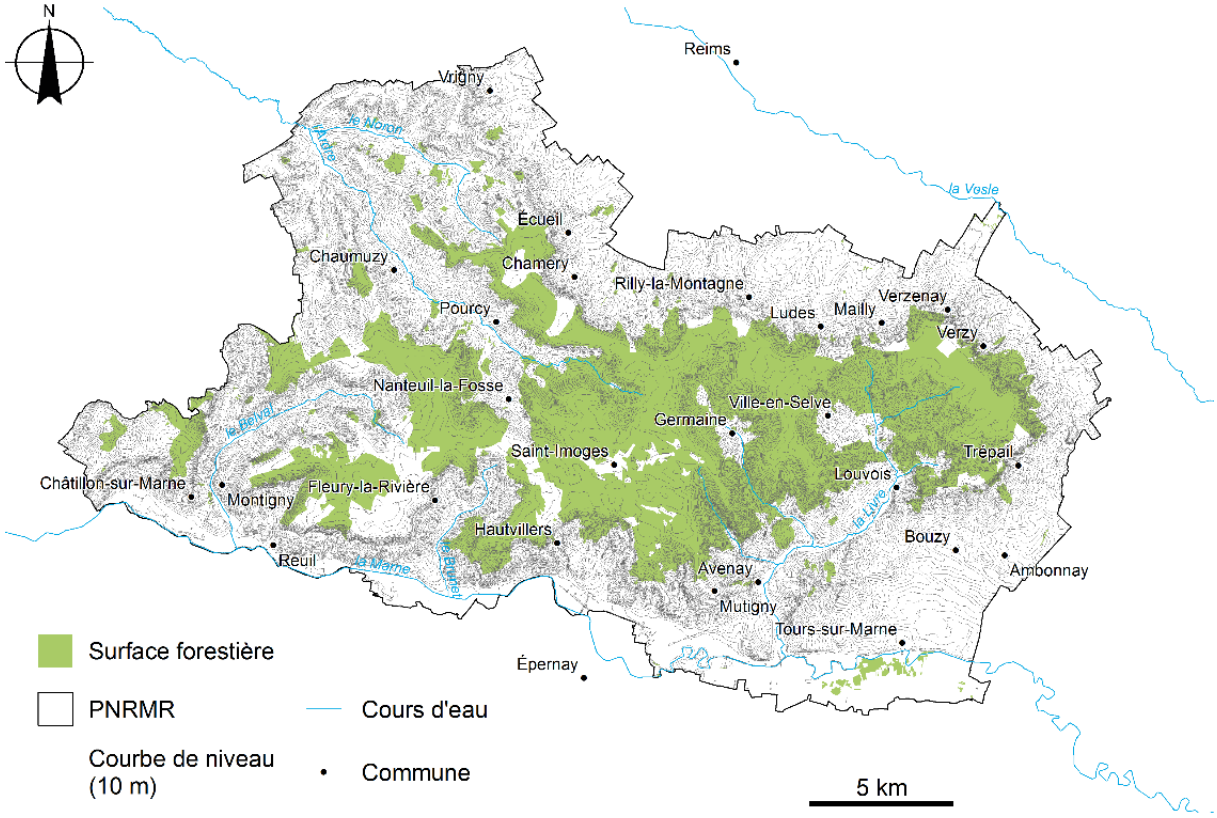
Annexe 16 : Les différentes configurations du saltus (d'après Verdier, 2013).



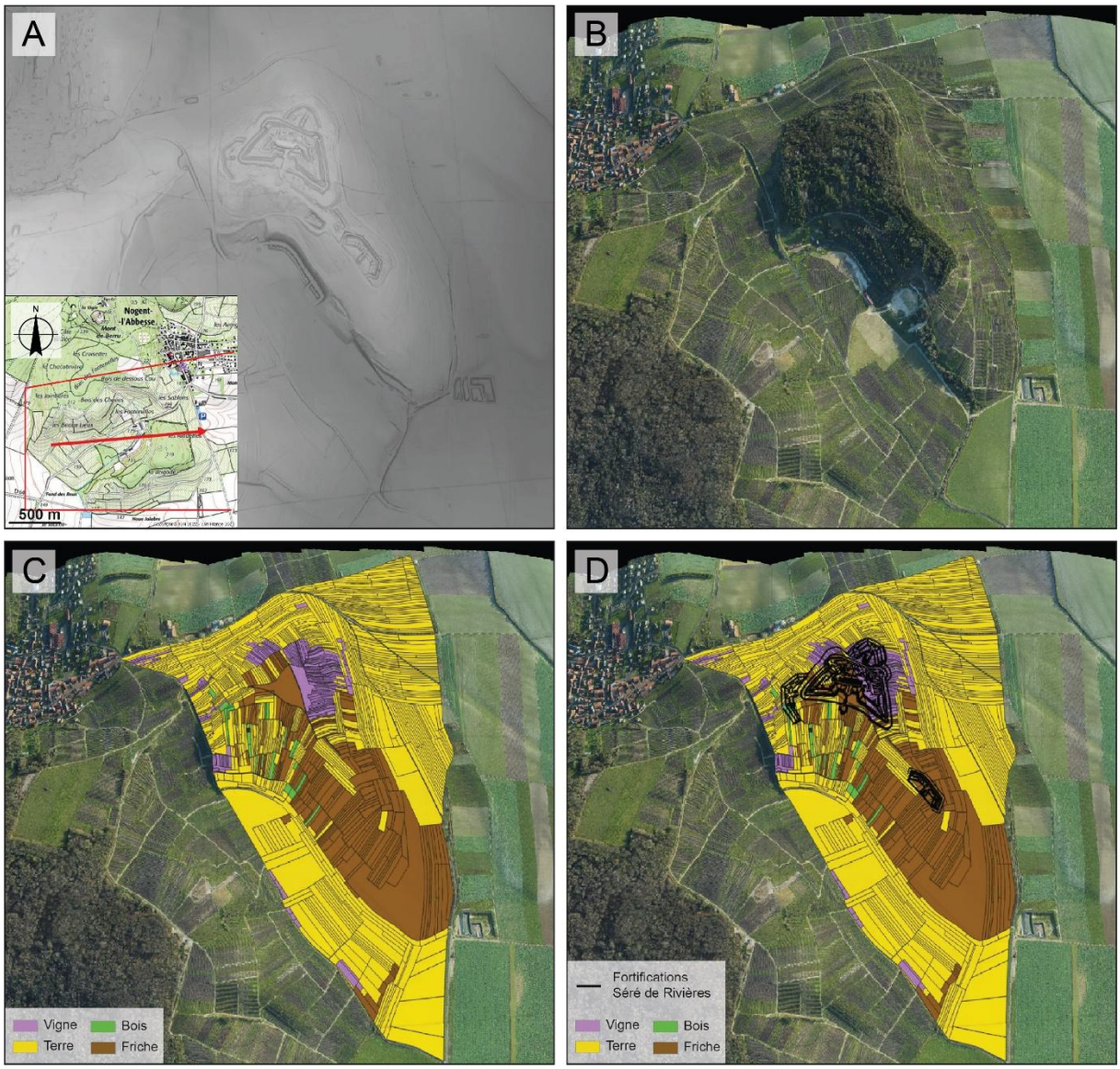
Annexe 17 : Évolution de l'occupation du sol de la commune de Trépail aux XVIIIe et XIXe siècles (d'après Berthe, 2024). A : Plan d'arpentage (1714 ; AD Marne, 30 B 70/1) ; B : Cadastre napoléonien de Trépail (1830 ; AD Marne, 3 P 1309) ; C : Plan directeur au 1/20 000e d'Ambonnay du 30 mai 1918 (GEGENA).



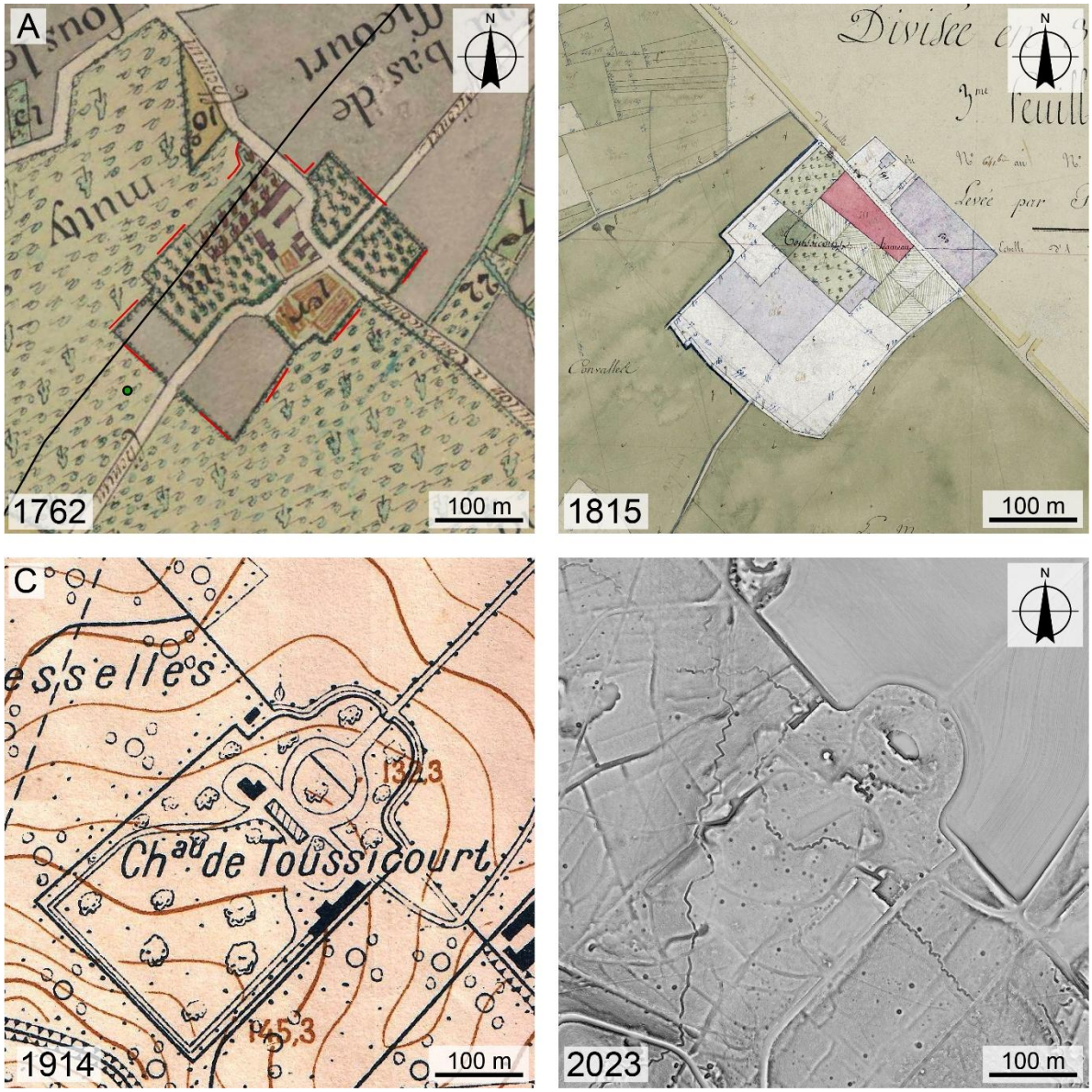
Annexe 18 : Surface forestière à la fin des années 1820 d'après la carte d'État-Major (1825-1831 ; Ancelin et al., 2025).



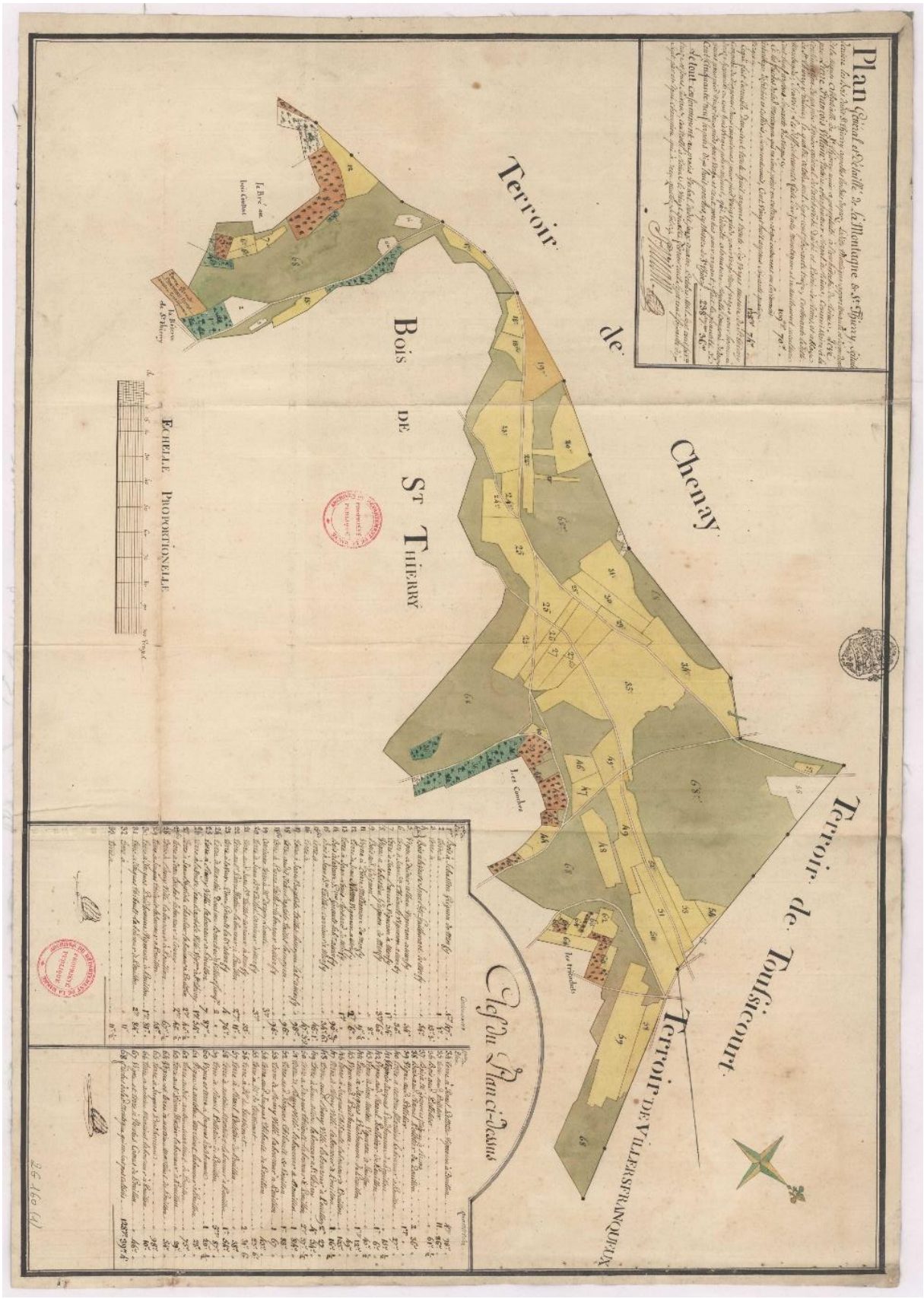
Annexe 19 : Occupation du sol sur la butte du fort de Nogent-l'Abbesse d'après le cadastre napoléonien (vue en 2,5 D). A : MNT LiDAR IMPACT 14-18 (2015, GEGENA) avec un ombrage en transparence (les altitudes les plus hautes tendent vers le blanc et inversement) ; B : Orthophotographie IMPACT 14-18 (2015, GEGENA) ; C-D : Usages du sol digitalisés à partir des feuilles G1-G3 du cadastre napoléonien de la commune de Nogent-l'Abbesse AD51, 3 P 1121/16-18), par rapport à l'emplacement du fort.



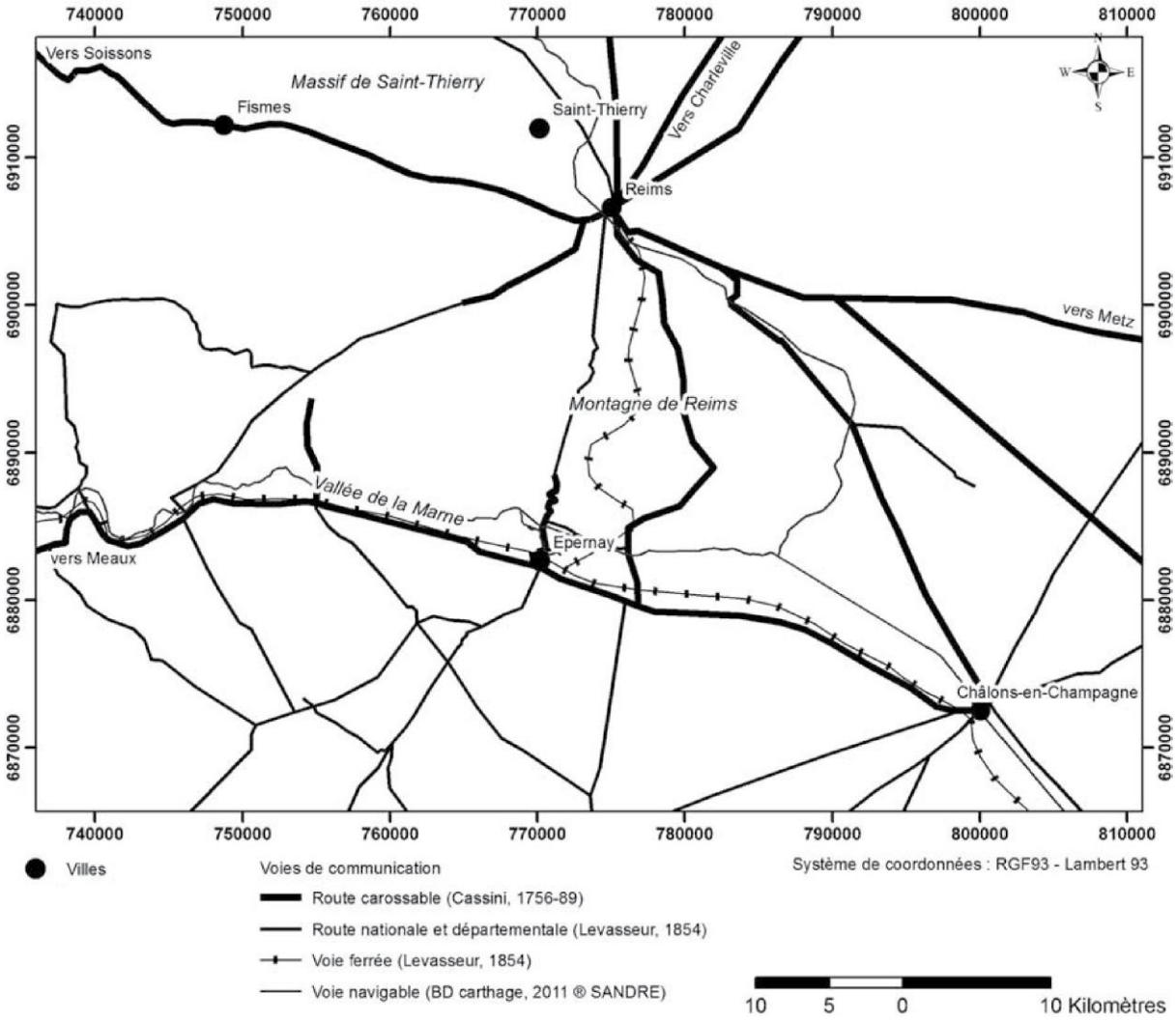
Annexe 20 : Ensemble documentaire diachronique du château de Toussicourt. A : Plan du village et terroir d'Hermonville et des hameaux et terroirs de Marzilly et Toussicourt (1762, Pierre Villain ; AD51, 2 G 160/17) ; B : Cadastre napoléonien de la commune d'Hermonville (sections E2-E3, 1815 ; AD51, 3 P 1005/9-10) ; Plan directeur de Berry-au-Bac SE au 1/10 000 du 22 mars 1917 (AD51) ; D : MNT LiDAR HD traité visuellement (pente + LRM en transparence ; 2023).



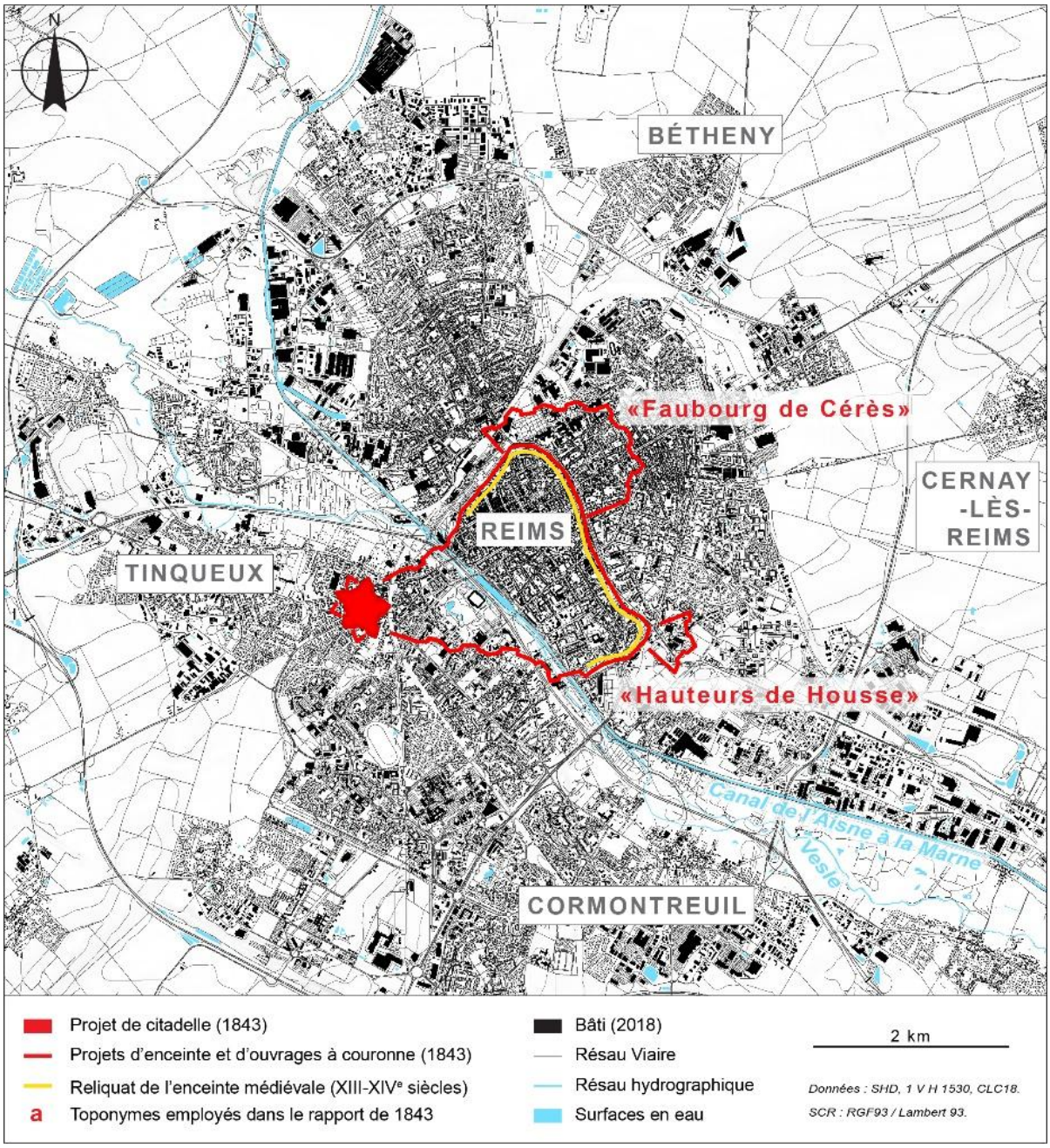
Annexe 21 : Plan général et détaillé de la montagne de Saint-Thierry dressé en 1777 par Pierre Villain (AD51, 2 G 160/1).



Annexe 22 : Réseaux terrestres et fluviaux des environs de Reims (Fronteau et al., 2014).



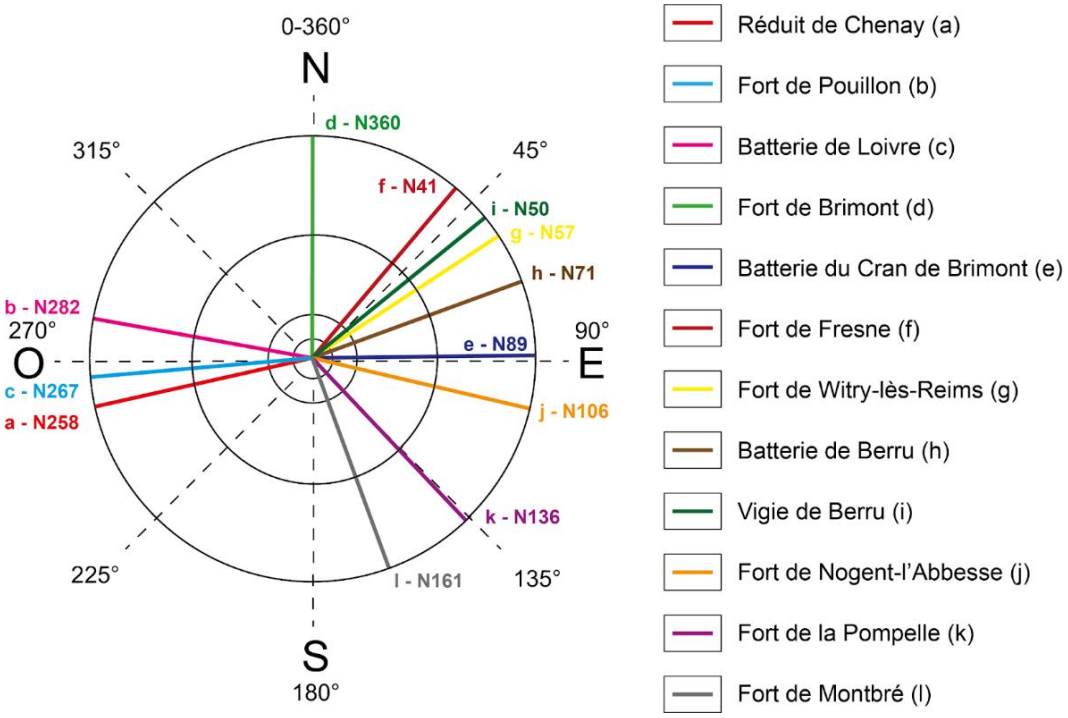
Annexe 23 : Projet de place forte pour Reims élaboré par le Comité des fortifications (1843), destiné à compenser la démolition partielle de l'enceinte médiévale lors du creusement du canal. Il prévoit une citadelle bastionnée en rive gauche de la Vesle, reliée à l'enceinte par des ouvrages à couronne et complétée par un dispositif hydraulique défensif.



Annexe 24 : Caractéristiques du projet de place forte de Reims de 1843 (Comité des fortifications, 1843).

Projet de place forte (Reims)	
Rédacteur	Chef de bataillon du génie Corrèze
Date	24 février 1843
Budget	11-14 millions de francs
Citadelle	
Emplacement	"Hauteurs de Geneviève"
Type	Pentagonale bastionnée
Caractéristiques	• Escarpes et contrescarpes maçonnées • Demi-lunes sur les fronts extérieurs (n=3) • Courtines casematées (n=5) pour le logement et les magasins • Logement officier casemate • 3 magasins à poudres
Raccordement citadelle - enceinte médiévale	
Caractéristiques	• Vers le NE (Porte de Vesle) : 2 fronts en terre avec fossé en eau • Vers le SE (Porte de Fléchambaud) : 5 fronts partiellement secs et maçonnés
Ouvrages secondaires	
Emplacements	"Hauteurs de Housse" et "Faubourg de Cérès"
Type	Ouvrage à couronne
Caractéristiques	Escarpes à forte inclinaison taillées dans la craie et recouverte d'un placage maçonné (*c*. 50cm)

Annexe 25 : Diagramme d'orientation des azimuts géographiques des forts Séré de Rivières de Reims (orientations correspondant à l'axe central des ouvrages).



Annexe 26 : Extrait du jugement d'expropriation du 27 août 1875 réalisé en vue de la construction des ouvrages des buttes de Berru et Brimont (source : fonds Fouqueray).

Décret d'utilité publique et d'urgence du 16 Février 1875.

JUGEMENT D'EXPROPRIATION DU 27 AOUT 1875.

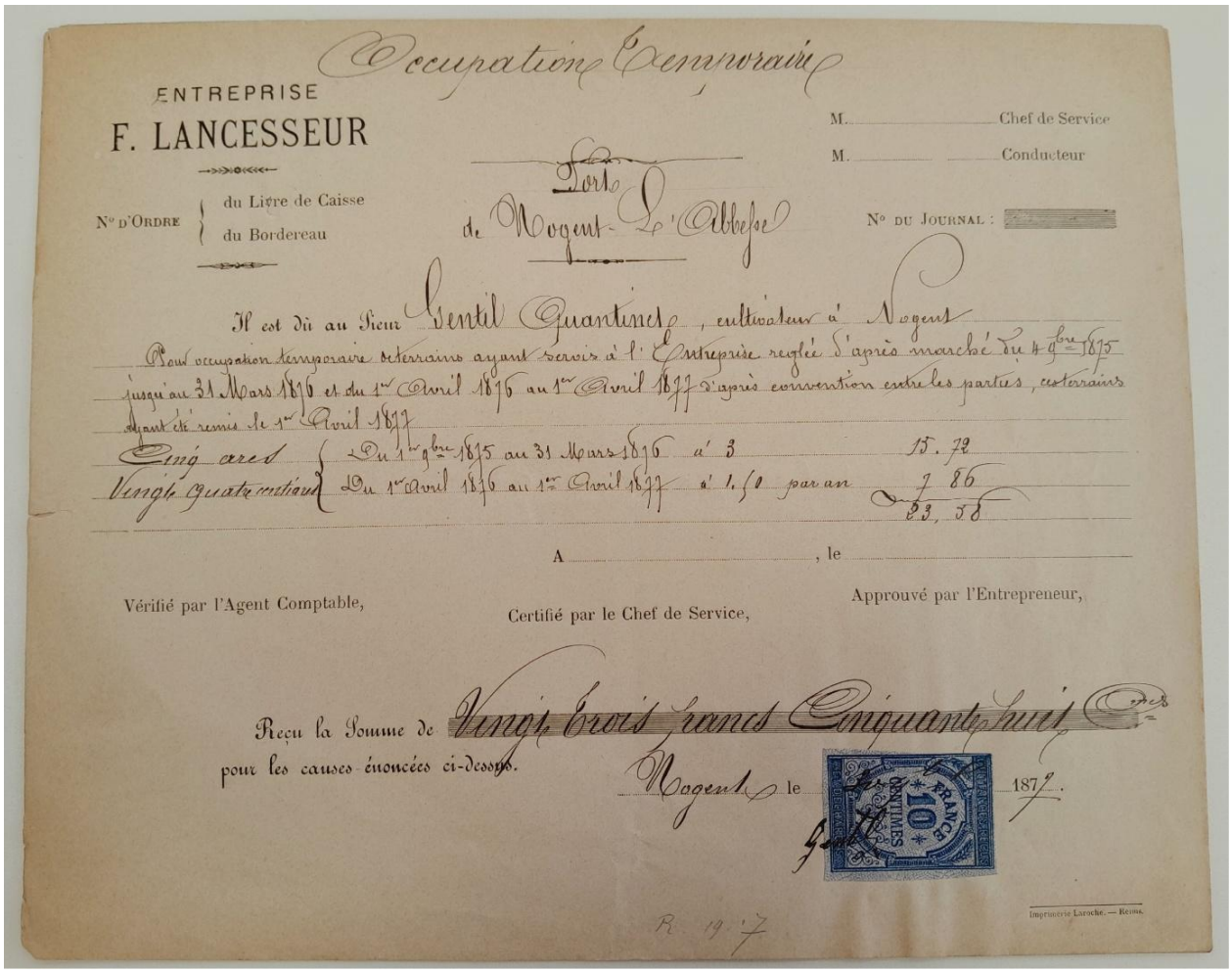
OUVRAGES DE BERRU & DE BRIMONT.

TABLEAU des offres et des demandes notifiées en exécution des articles 23 et 24 de la loi du 3 Mai 1841, dans les affaires dont la désignation suit, soumises au jury spécial d'expropriation, convoqué à Reims, le 20 Mai 1876

CADASTRE Section	CADASTRE Numéro	CANTON OU LIEUDIT	NATURE de la PROPRIÉTÉ	CONTENANCE de la PROPRIÉTÉ	MONTANT DES OFFRES	MONTANT des DEMANDES	OBSERVATIONS
		§ 1er. — M. VARENNES (AUGUSTE), *Président du Tribunal civil de Reims.*					
		Commune de Nogent-l'Abbesse.					
G.	195	Mouchard des Reux	friche	3 »	18 »	» »	
G.	206	*id.*	bois et friche	4 20	21 »	» »	
G.	244	*id.*	friche	3 30	13 20	» »	
G.	245	*id.*	friche	5 50	22 »	» »	
G.	249	*id.*	friche	4 80	24 »	» »	
G.	251	*id.*	friche	2 95	11 80	» »	
G.	263	*id.*	friche	3 10	15 50	» »	
G.	269	*id.*	friche	5 60	28 »	» »	
G.	296	*id.*	friche	2 85	8 55	» »	Sa demande allouée par le jury
G.	301	*id.*	friche	2 65	7 95	» »	à Mr. Varennes,
G.	329	*id.*	friche	4 90	24 50	» »	
G.	335	*id.*	friche	4 30	21 50	» »	
G.	530	Le Mont-Gras	friche	4 80	24 »	» »	
G.	531	*id.*	friche	3 20	16 »	» »	
G.	695	Les Vignes du Mont-de-Mouchard	friche	5 50	27 50	» »	
G.	703	*id.*	friche	5 80	29 »	» »	
G.	988	La Brigode	friche	5 80	29 »	» »	
G.	1005	*id.*	friche	6 »	36 »	» »	
G.	1009	*id.*	friche	3 10	18 60	» »	
G.	1030	*id.*	friche	2 50	15 »	» »	
G.	1043p.	*id.*	friche	5 20	31 20	» »	
G.	1044p.	*id.*	friche	13 50	81 »	» »	
G.	1061p.	*id.*	friche	5 75	34 50	» »	
		ci. . .		108 30	557 80	» »	
		Taillis sur la parcelle N° 206.			4 20	» »	
		TOTAUX. . . .			562 »	1605 »	La demande de M. Varennes ne contient pas de détail.
		§ 2. — LECLÈRE-PROVIGNON (ADONIS), à Berru.					
		Commune de Nogent-l'Abbesse.					Sa demande allouée à Mr. Leclère Provignon, 100. »
A.	616	Trio du Midi	bois	5 80	31 90	» »	Le sieur Leclère n'a pas fait de demande.
		§ 3. — HUTIN-GEORGIN (CHARLES-DÉSIRÉ), à Reims.					
		Commune de Nogent-l'Abbesse.					
A.	558	Le Mont-de-Trio	bois	3 50	10 50	35 »	
A.	580	*id.*	bois	5 40	37 80	54 »	
A.	602	Le Trio-du-Midi	bois	6 50	32 50	78 »	
A.	603p.	*id.*	bois	4 40	22 »	52 80	
A.	604	*id.*	bois	13 20	66 »	158 40	
		Reporter . . .		33 »	168 80	378 20	

Imp. coop. de Reims.

Annexe 27 : Quittance d'indemnité d'occupation temporaire délivrée à un propriétaire à l'issue de l'occupation des terrains par l'entreprise Lancesseur chargée de la construction des ouvrages du Mont de Berru (Nogent-l'Abbesse, 1877 ; AD51, 2U733).



Occupation Temporaire

ENTREPRISE

F. LANCESSEUR

M. ..... Chef de Service

M. ..... Conducteur

N° d'Ordre { du Livre de Caisse / du Bordereau

Fort de Nogent-l'Abbesse

N° du Journal :

Il est dû au Sieur Gentil Quantinet, cultivateur à Nogent

Pour occupation temporaire de terrains ayant servis à l'Entreprise reglée d'après marché du 4 9bre 1875 jusqu'au 31 Mars 1876 et du 1er Avril 1876 au 1er Avril 1877 d'après convention entre les parties, ces terrains ayant été remis le 1er Avril 1877

Cinq ares { Du 1er 9bre 1875 au 31 Mars 1876 à 3 ..... 15. 72
Vingt Quatre centiares { Du 1er Avril 1876 au 1er Avril 1877 à 1,50 par an 7 86
23, 58

A ....., le .....

Vérifié par l'Agent Comptable,

Certifié par le Chef de Service,

Approuvé par l'Entrepreneur,

Reçu la Somme de Vingt trois francs Cinquante huit c.

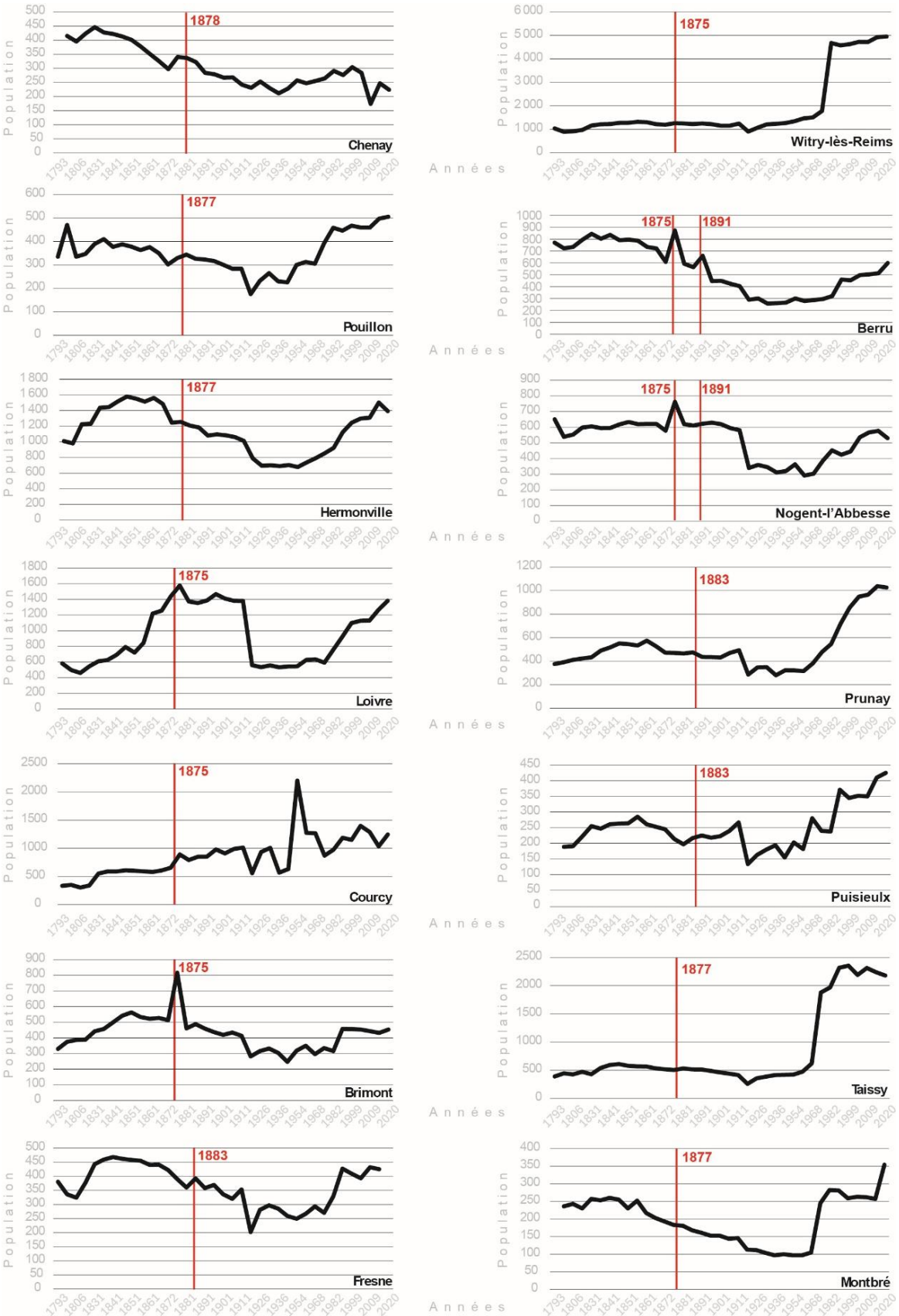
pour les causes énoncées ci-dessus.

Nogent le 1877.

R 197

Imprimerie Laroche. — Reims.

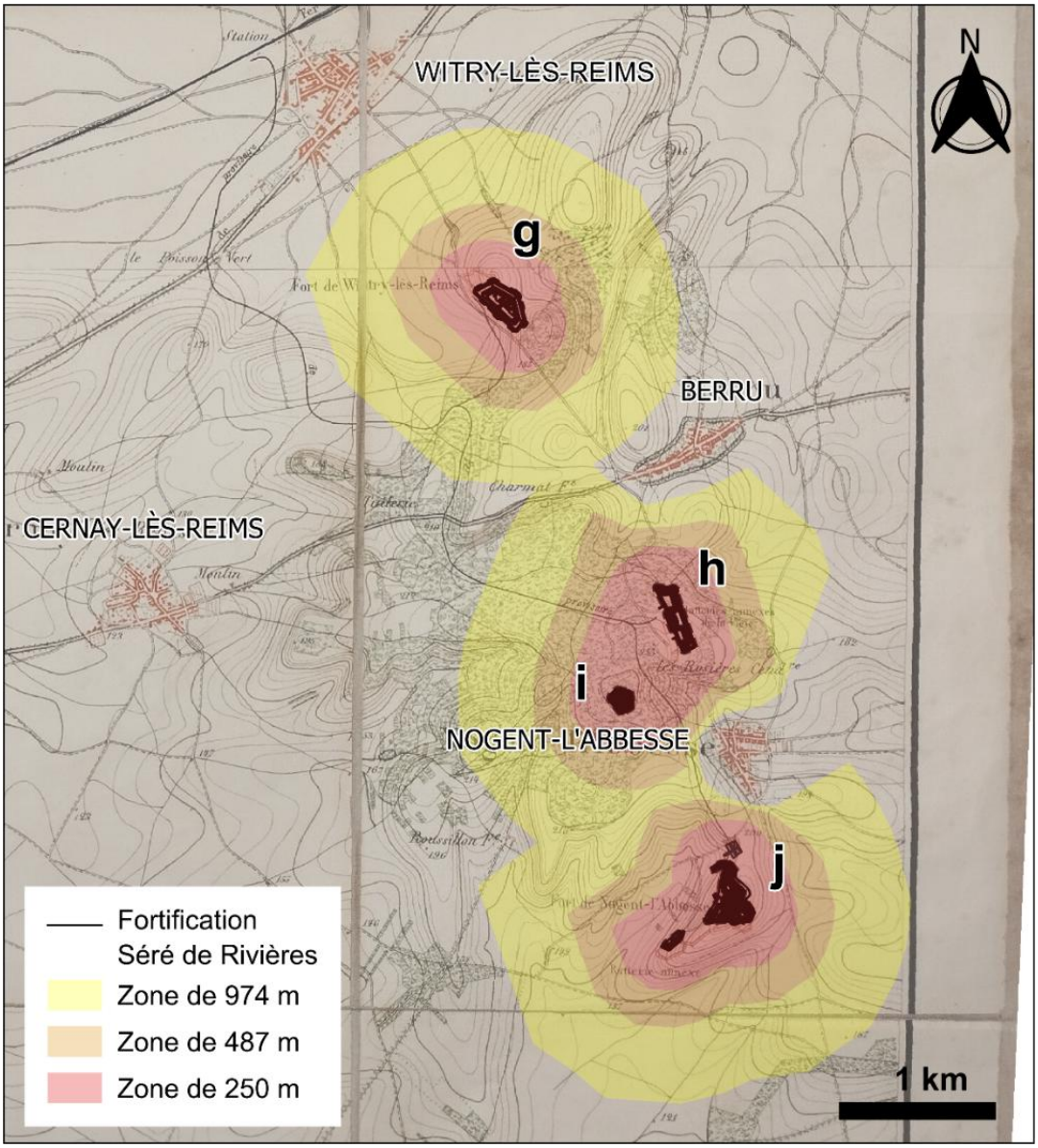
Annexe 28 : Evolution de la population des communes situées à proximité d'un ouvrage fortifié (d'après la sous-série 121/122 M « Dénombrement de la population (1799-1936) » des AD51 ; *cf.* partie 4.1.2.2).



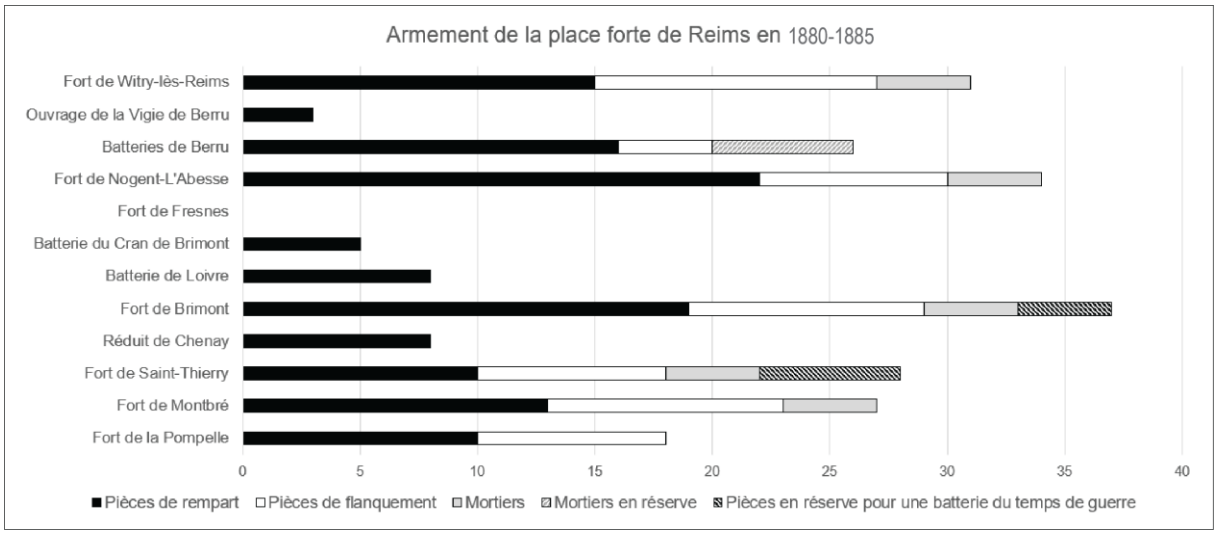
Annexe 29 : Deux monnaies de nécessité éditées au service des entreprises de construction des forts de Berru (à gauche) et Brimont (à droite ; Durlet I., 2024).



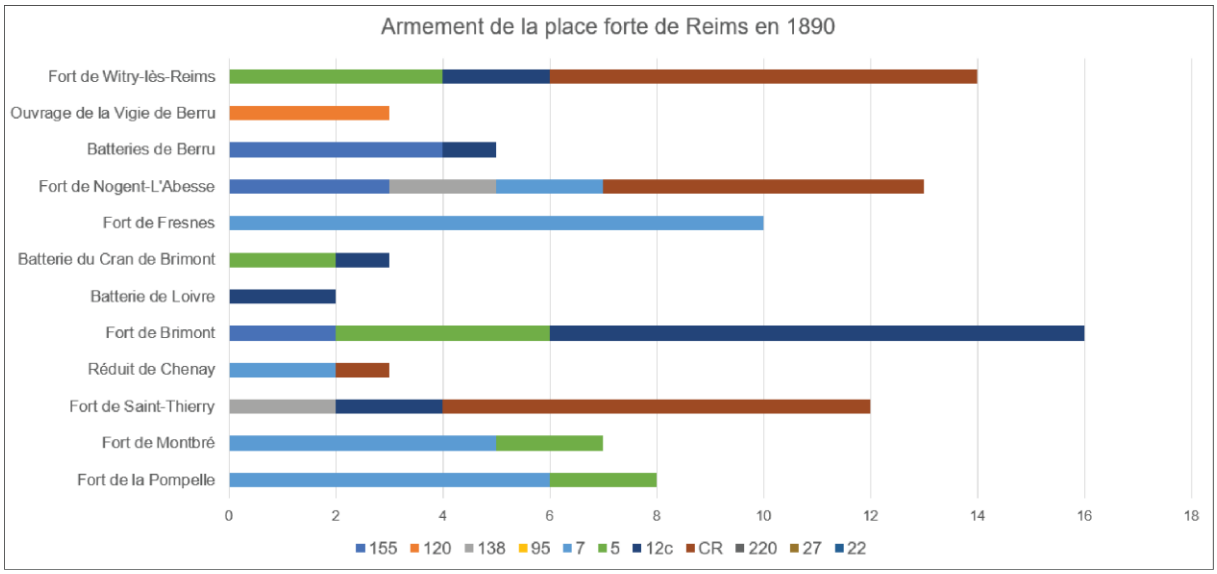
Annexe 30 : Proposition de reconstitution des zones concentriques de servitude (250, 487 et 974 m), dont le caractère contraignant décroît avec la distance, et qui visent à limiter toute implantation ou transformation susceptible de nuire aux exigences de la défense (*cf.* partie 2.4.2).



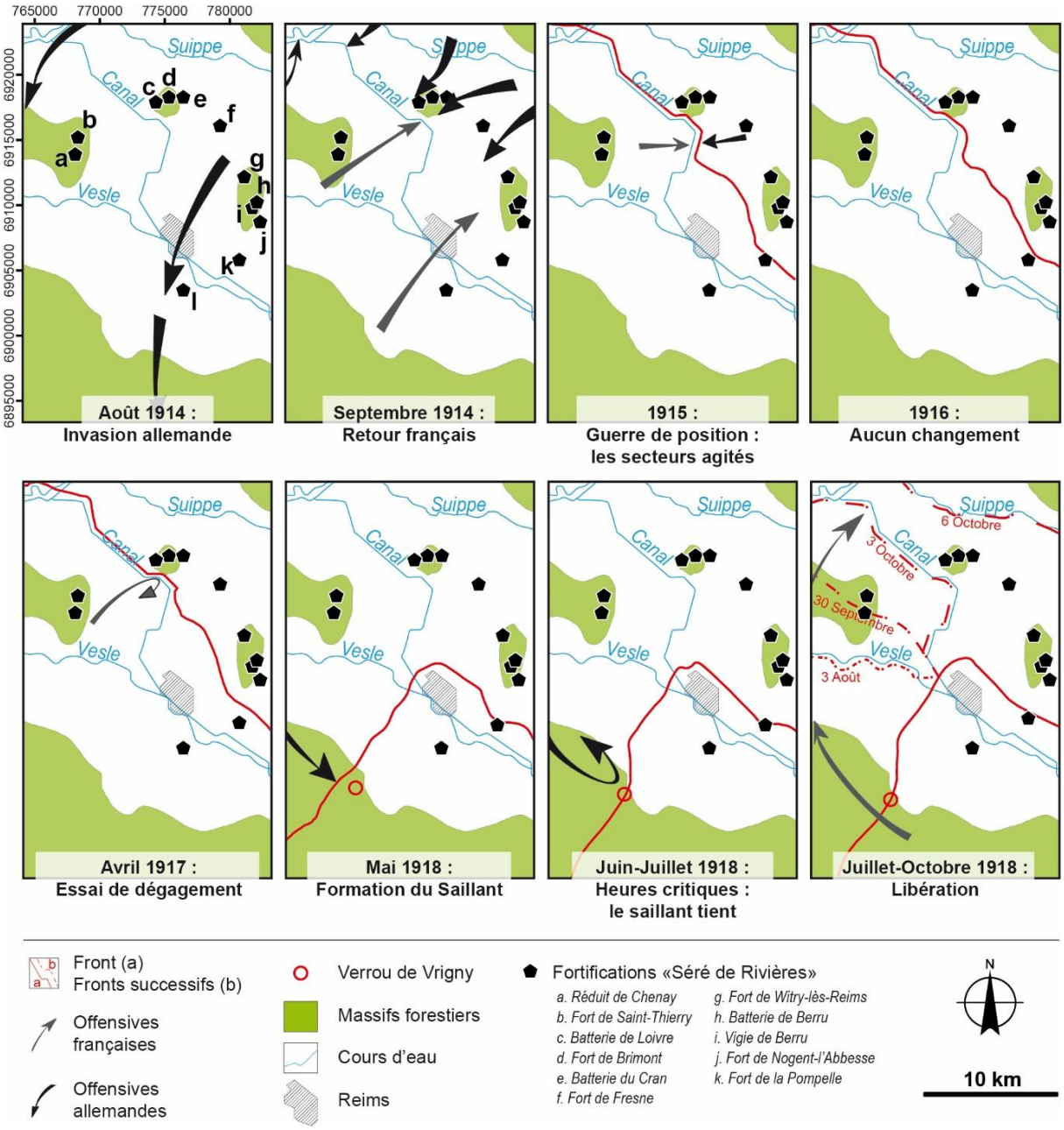
Annexe 31 : Armement de la place forte dans la première moitié des années 1880 déterminé à partir des feuilles de renseignements sur les « nouveaux forts » créés en 1880-1881 (SHD, GR 1 V H 2079) et de Coutant el al. (2017) pour le fort de la Pompelle.



Annexe 32 : Armement de la place forte à la date du 28 mai 1890 (SHD, GR 9 NN 4 156 1 2).



Annexe 33 : Évolution schématique de la ligne de front pendant la Première Guerre mondiale dans le secteur de Reims (d'après Dodici, 2015 et Manufacture française des pneumatiques Michelin, 2020).



Annexe 34 : Incendie de la cathédrale de Reims après le bombardement allemand du 19 septembre 1914 réalisé depuis les hauteurs de la butte de Berru (*University of Dayton, Marian Library Postcard Collection*).



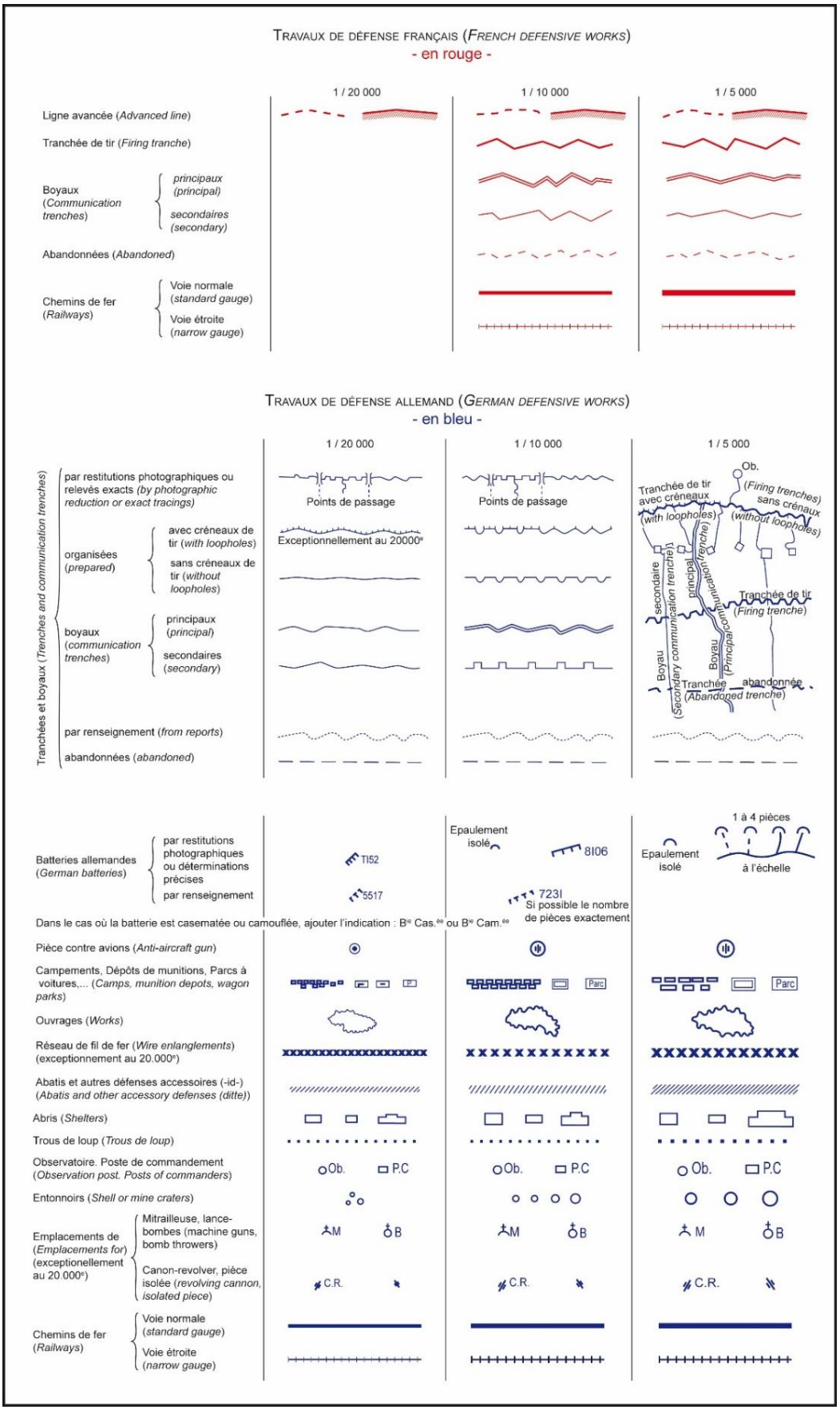
Annexe 35 : Extrait du cadre de classement des archives du SHD mis en ligne.



Annexe 36 : Extrait du plan de la portion de route de Reims à Rethel (« Retel ») passant par Witry-lès-Reims (« Vitry ») issu de l'Atlas de Trudaine pour la généralité de Châlons (Archives Nationales, CP/F/14/8472).



Annexe 37 : Légende des travaux de défense français et allemands (Combaud et al., 2016 ; Taborelli, 2018).



Annexe 38 : Inventaire des photographies aériennes disponibles entre 1935 et 2013 sur le site Remonter le temps pour chaque fortification de la ceinture fortifiée Séré de Rivières de Reims.

F	07/35	04/49	07/49	04/57	03/59	04/60	08/62	03/63	01/67	11/68	03/69	01/70	01/73	05/73	06/75
a		x	x	x		x	x	x	x	x	x	x		x	x
b		x		x			x	x	x		x	x		x	x
c		x			x	x	x	x			x	x		x	x
d	x	x			x	x					x	x		x	x
e		x			x	x						x		x	x
f		x		x			x	x	x	x	x	x		x	x
g			x	x			x	x	x	x		x	x		x
h			x	x			x	x	x	x		x	x		x
i			x	x			x	x	x	x		x	x		x
j	x		x	x			x	x	x	x		x	x		x
k			x	x			x	x	x	x		x	x		x
l			x	x			x	x	x	x		x	x		x

F	06/78	09/79	05/80	08/81	07/82	06/83	07/84	04/88	07/90	08/91	06/93	07/94	07/96	04/97	09/99
a	x	x		x	x	x	x	x	x		x	x	x		x
b	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
c	x	x	x		x		x		x	x		x	x	x	x
d	x	x			x		x		x			x	x		x
e		x			x		x		x			x	x		x
f	x	x	x			x	x	x	x		x	x	x	x	x
g	x	x		x	x		x	x	x		x	x	x		x
i	x	x		x	x		x	x	x		x	x	x		x
h	x	x		x	x		x	x	x		x	x	x		x
j	x	x		x	x		x	x	x		x	x	x		x
k	x	x		x	x		x	x	x		x	x	x		x
l	x	x		x	x		x	x	x		x	x	x		x

F	06/00	05/01	08/04	07/06	08/08	07/10	07/11	08/11	09/13
a		x	x	x	x			x	x
b		x	x	x	x			x	x
c			x	x	x	x		x	x
d	x		x	x	x	x		x	x
e	x		x	x	x	x		x	x
f			x	x	x		x	x	x
g			x		x		x	x	x
h			x		x		x	x	x
i			x		x		x	x	x
j			x		x		x	x	x
k			x		x		x	x	x
l			x		x			x	x

F - Forts :

a. Réduit de Chenay
b. Fort de Saint-Thierry
c. Batterie de Loivre
d. Fort de Brimont
e. Batterie du Cran
f. Fort de Fresne
g. Fort de Witry-lès-Reims
h. Batterie de Berru
i. Vigie de Berru
j. Fort de Nogent-l'Abbesse
k. Fort de la Pompelle
l. Fort de Montbré

Annexe 39 : Description des objets associés à chaque classe de points LiDAR. Les huit premières classes suivent les valeurs standard définies par les spécifications ASPRS, tandis que les trois dernières correspondent à des classes spécifiques introduites par l'IGN.

Classe	LIDAR GEGENA IMPACT 14-18	LIDAR HD IGN
1	Non classé	Non classé
2	Sol	Sol
3	/	Végétation basse (0-50 cm)
4	/	Végétation moyenne (50 cm-1,5 m)
5	Végétation (> 0,5 m)	Végétation haute (+ 1,5 m)
6	Bâti	Bâti
9	Eau	Eau
17	/	Tablier de pont
64	/	Sursol pérenne
66	/	Points virtuels
67	/	Divers - bâti

Annexe 40 : Protocole de calcul de la densité de points LiDAR au sol à partir d'un jeu de données LAS (ArcGIS).

1. [Création d'un jeu de données LAS], qui crée un fichier vide (extension : « .lasd »).

2. Ajout des données brutes issues de l'acquisition à évaluer, à savoir le nuage de points découpé en plusieurs fichiers (extension : « .las »), au jeu de données LAS créé lors de l'étape n°1.

3. Création d'une [couche de jeu de données LAS] (paramètre : code de classes = 2) permettant d'isoler la classe de points « sol » au sein du jeu de données LAS créé lors de l'étape n°1.

4. Utilisation de l'outil [Statistiques de points LAS sous forme de raster] (paramètres : méthode = « *POINT_COUNT* » ; Type d'échantillonnage = « *CELLSIZE* » ; Valeur d'échantillonnage = « 0,5 » ou « 25 » en fonction de la résolution souhaitée).

5. Génération de la table attributaire du raster de densité de points au sol créée lors de l'étape n°4 et exploitation des statistiques *via* Excel.

Annexe 41 : Procédure de contrôle et de correction de la classification des points « sol » sous Cloud Compare, visant à vérifier la continuité morphologique du nuage de points et, le cas échéant, à réintégrer manuellement les points sol manquants avant la production des MNT et des analyses morphométriques.

1. Ouverture, dans CloudCompare, du jeu de données LiDAR à contrôler, correspondant au nuage de points brut issu de l'acquisition.

2. Visualisation de la classification du nuage de points :
   a. Activation du champ scalaire « Classification » dans le panneau Scalar Fields, afin de vérifier la répartition des classes.

3. Extraction de la classe de points « sol » :
   a. Utilisation de l'outil « Filter points by value » ;
   b. Définition de l'intervalle correspondant à la classe sol (2-2) ;
   c. Export de la sélection afin de créer un nuage de points contenant uniquement les points classés sol.

4. Contrôle visuel de la qualité du nuage de points sol extrait :
   a. Vérification de la continuité spatiale et de la cohérence morphologique des points sol ;
   b. En l'absence d'anomalie ou d'incohérence, aucune correction n'est apportée et le nuage est conservé tel quel ;
   c. En cas d'irrégularités identifiées, notamment une absence de points sol au droit d'éléments structuraux caractéristiques (caponnière, traverse-abri, massif de terre), passage à l'étape suivante.

5. Rectification manuelle du nuage de points sol :
   a. Reprise du nuage de points brut initial ;
   b. Analyse de la répartition des différentes classes afin d'identifier celles contenant les points manquants ;
   c. Extraction de la ou des classes concernées selon la procédure décrite à l'étape 3 ;
   d. Application de l'outil « Segment » sur le nuage extrait :
   i. Digitalisation d'un polygone englobant les points à conserver ;
   ii. Sélection de l'option « Segment in » pour isoler ces points ;
   iii. Validation de l'opération via « Confirm segmentation », conduisant à la création d'un nuage de points intermédiaire ne contenant que les points sélectionnés ;
   e. Fusion du nuage de points obtenu à l'étape précédente avec le nuage de points sol initial afin de produire un nuage de points sol corrigé.

6. Enregistrement du nuage de points sol corrigé à l'aide de l'outil « Save », en vue de son exploitation ultérieure pour la génération des MNT et les analyses morphométriques.

Annexe 42 : Exemple d'évaluation qualitative empirique des différentes techniques de visualisation par rapport au type de structure archéologique (a ; Kokalj et Hesse, 2017), au type de relief (b ; Mayoral et al., 2017) et des deux à la fois (c ; Chevigny et al., 2018).

a

	mining pits	former field boundaries	burial mounds	terraces	hollow ways	ridge and furrow
						
shaded relief	-	-	+	o	o	-
slope	-	o	o	+	+	++
principal components analysis	-	-	+	o	+	++
trend removal and LRM	++	+	++	+	+	++
sky-view factor	++	+	o	++	++	++
openness	++	+	+	+	++	++
local dominance	++	++	++	+	++	++
cumulative visibility	-	-	+	o	+	o
accessibility	-	o	-	o	o	-
multi-scale integral invariants	+	+	o	+	+	+
Laplacian-of-Gaussian	+	+	++	+	+	++

- not suitable; o indistinct; + suitable; ++ very suitable

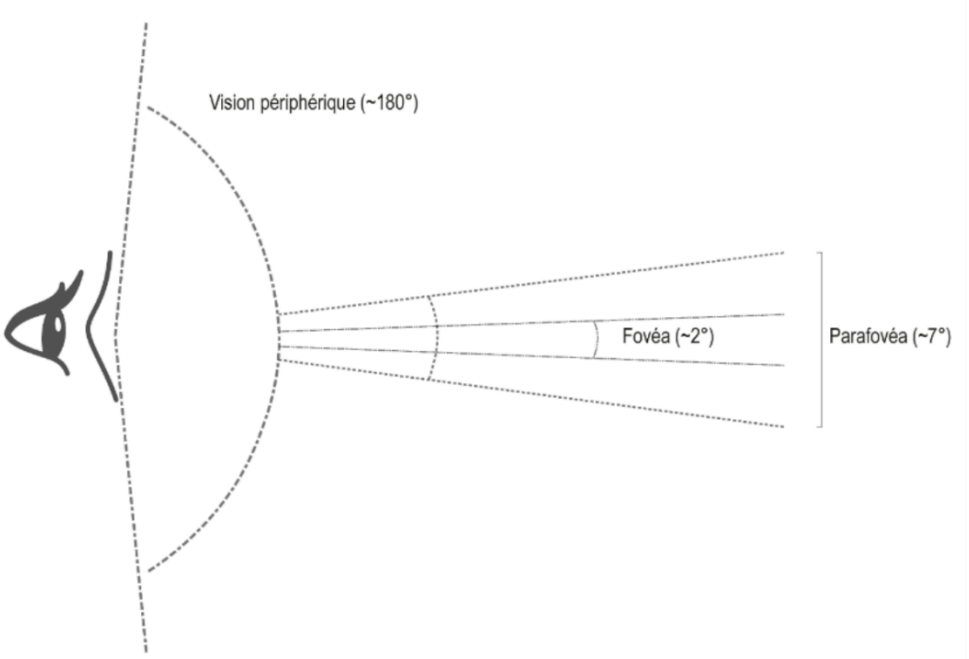
b

	Rock Slumps Scars	Flood Channels	Ancient Field Patterns
SLOPEVIS	+++	—	—
LRM	+	++	+++
SVF	+	+	+
OPPOS	++	++	+++
OPNEG	+++	+++	++
IFACT	++	+++	++

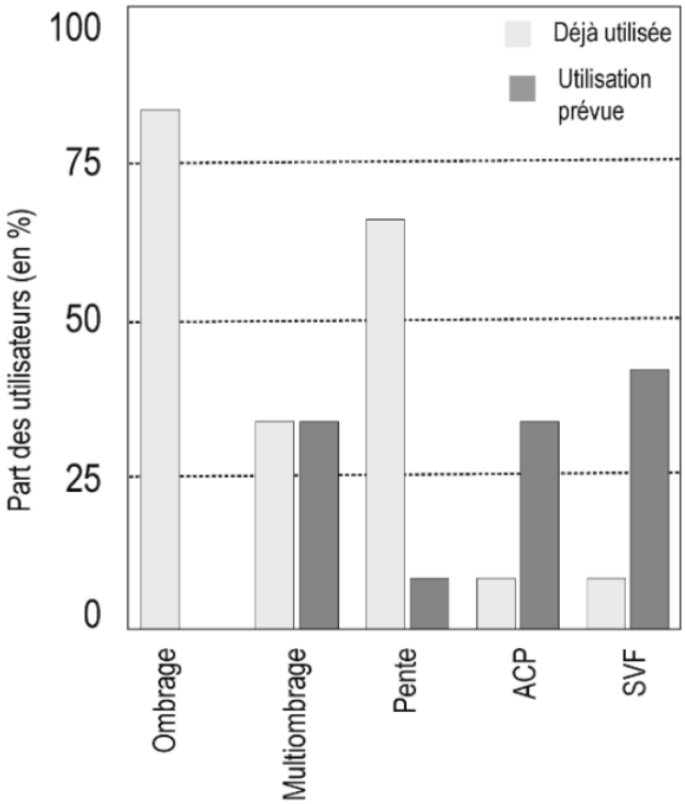
c

Types/indices	*SkyView Factor*	Pentes	Ouv. Topo positive	Ouv. Top négative	ACP Ombrage	Ombrage
Carrières	Plateau					Plateau/ Versant
Charbonnières		Versant	Plateau/ Fond de vallon			
Chemins	Plateau	Plateau	Plateau/ Versant/ Fond de vallon	Plateau/ Versant/ Fond de vallon		
Fossé	Plateau	Plateau	Plateau/ Versant/ Fond de vallon	Plateau/ Versant/ Fond de vallon		
Four à Chaux		Versant / Plateau	Versant / Plateau			
Lapiaz	Plateau				Plateau/ Versant	
Murée/Levée	Plateau	Plateau	Plateau/ Versant			
Murée sur épaulement	Plateau	Plateau	Plateau/ Versant		Plateau/ Versant	
Epaulement		Plateau			Plateau	Plateau
Tertres / Pierriers / Tumulus	Versant / Plateau		Versant / Plateau	Versant / Plateau	Plateau/ Versant	Plateau/ Versant

Annexe 43 : Les trois régions principales de la vision (traduit de Norling, 2009).

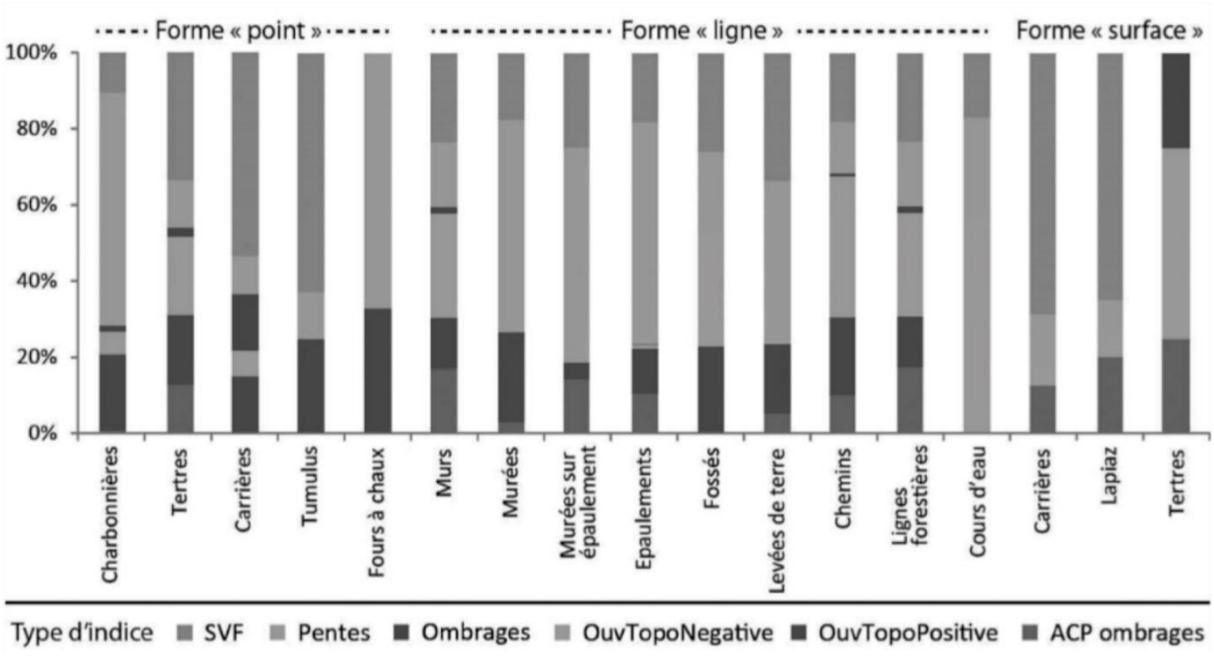


Annexe 44 : Résultat d'une enquête sur les préférences d'opérateurs expérimentés (n=12) de certaines méthodes de visualisation.

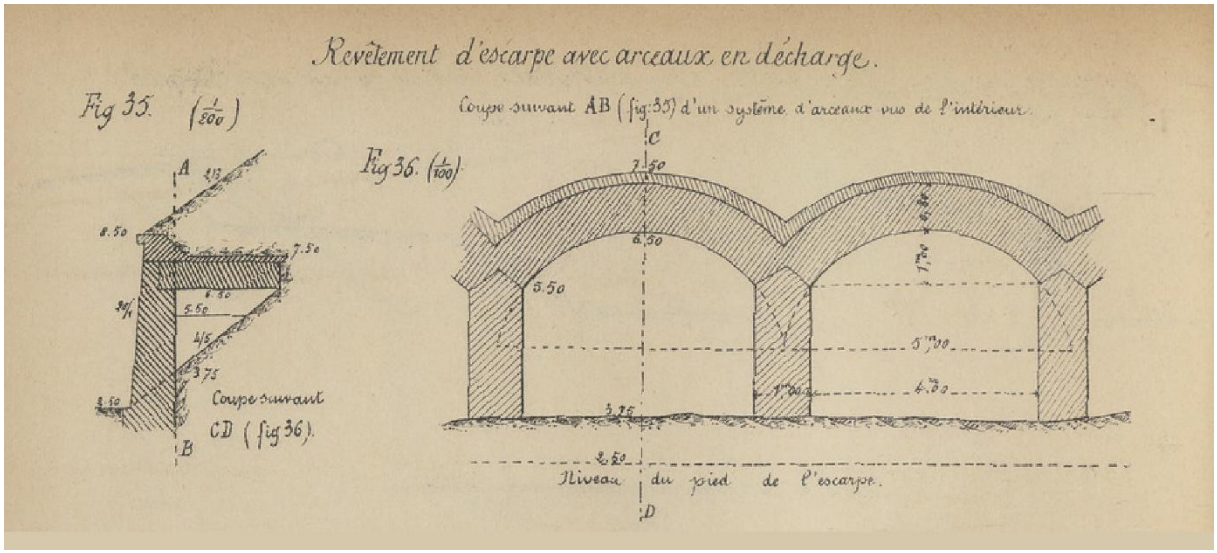


Les techniques vers la gauche tendent à être couramment utilisées et vers la droite elles sont désirées pour l'avenir en 2012. La pluralité des goûts et la préférence majeure pour l'ombrage et la pente (techniques les plus simples) sont bien mises en évidence. De même l'intérêt porté pour des traitements plus complexes image leur démocratisation pendant les années 2010 (modifiée et traduite de Stular et al., 2012).

Annexe 45 : Distribution des divers traitements de visualisation utilisés par des opérateurs plus ou moins aguerris (n=8) en fonction du type de structure identifié (Chevigny et al., 2018). Les différentes approches se remarquent par la pluralité des traitements utilisés pour chaque type de structure. D'autre part, certaines formes ont été digitalisées avec des formes vectorielles divergentes, à l'image des carrières et des tertres (polygonal et ponctuel). Ce graphique exprime bien l'influence de la subjectivité de l'observateur.



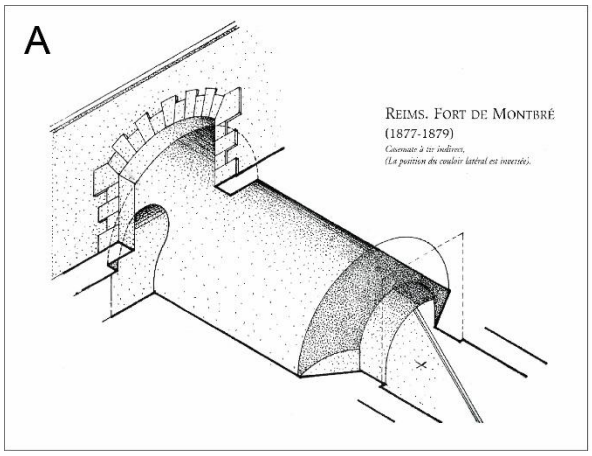
Annexe 46 : Revêtement d'escarpe avec arceaux en décharge de profil (à gauche) et de face (à droite ; Simoutre, 1889).

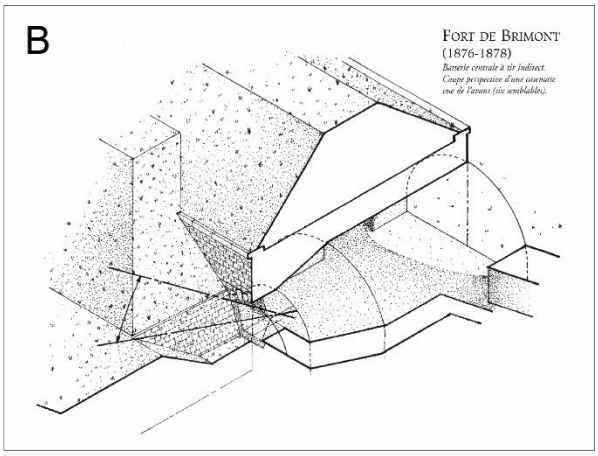


Annexe 47 : Escalier reliant l'une des caponnières du fort de Montbré au chemin des rondes (cl : Alani Devos).

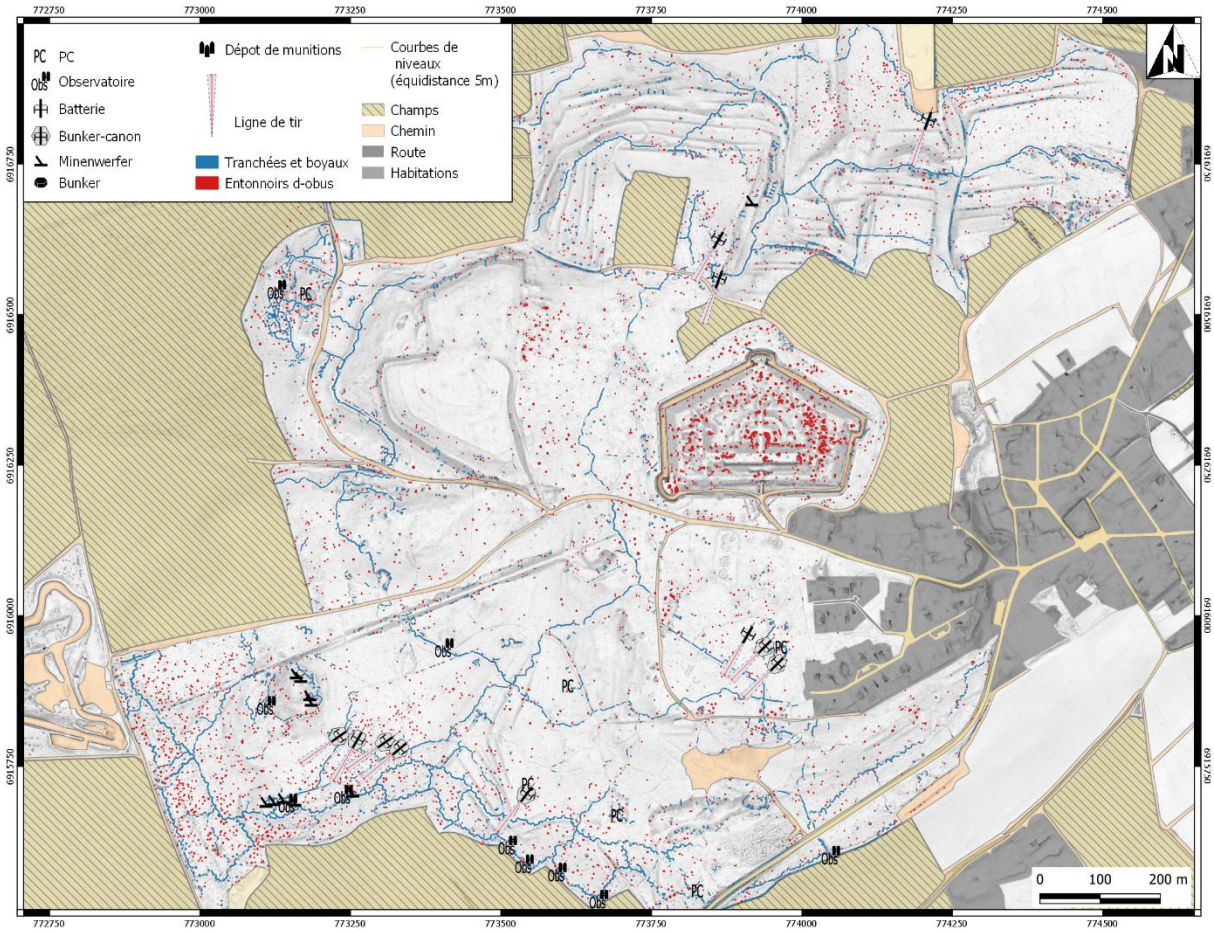


Annexe 48 : Croquis perspective de caves à canon ou casemates à tir indirect (Truttmann, 2017). A : Fort de Montbré ; B : Fort de Brimont.

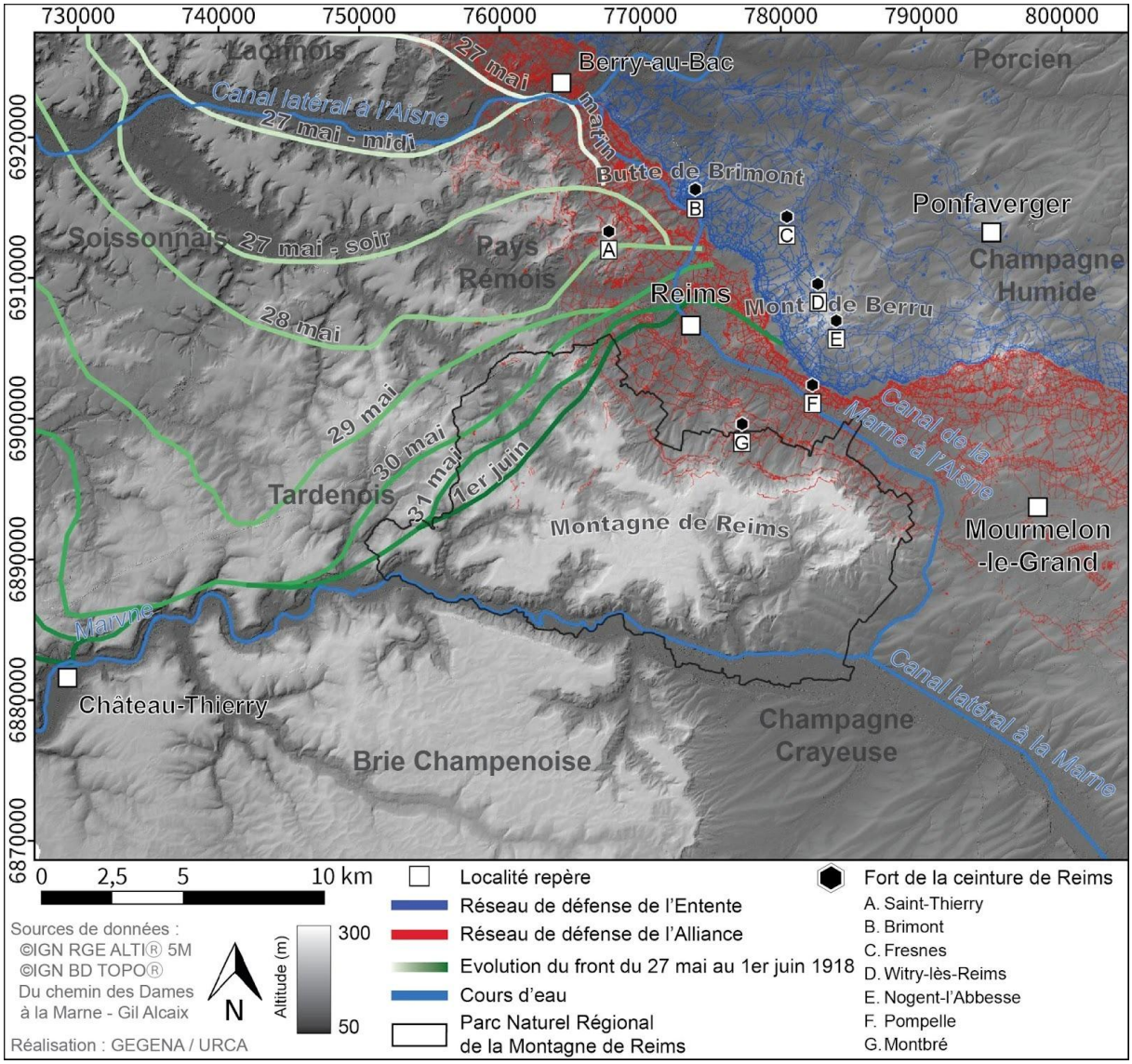




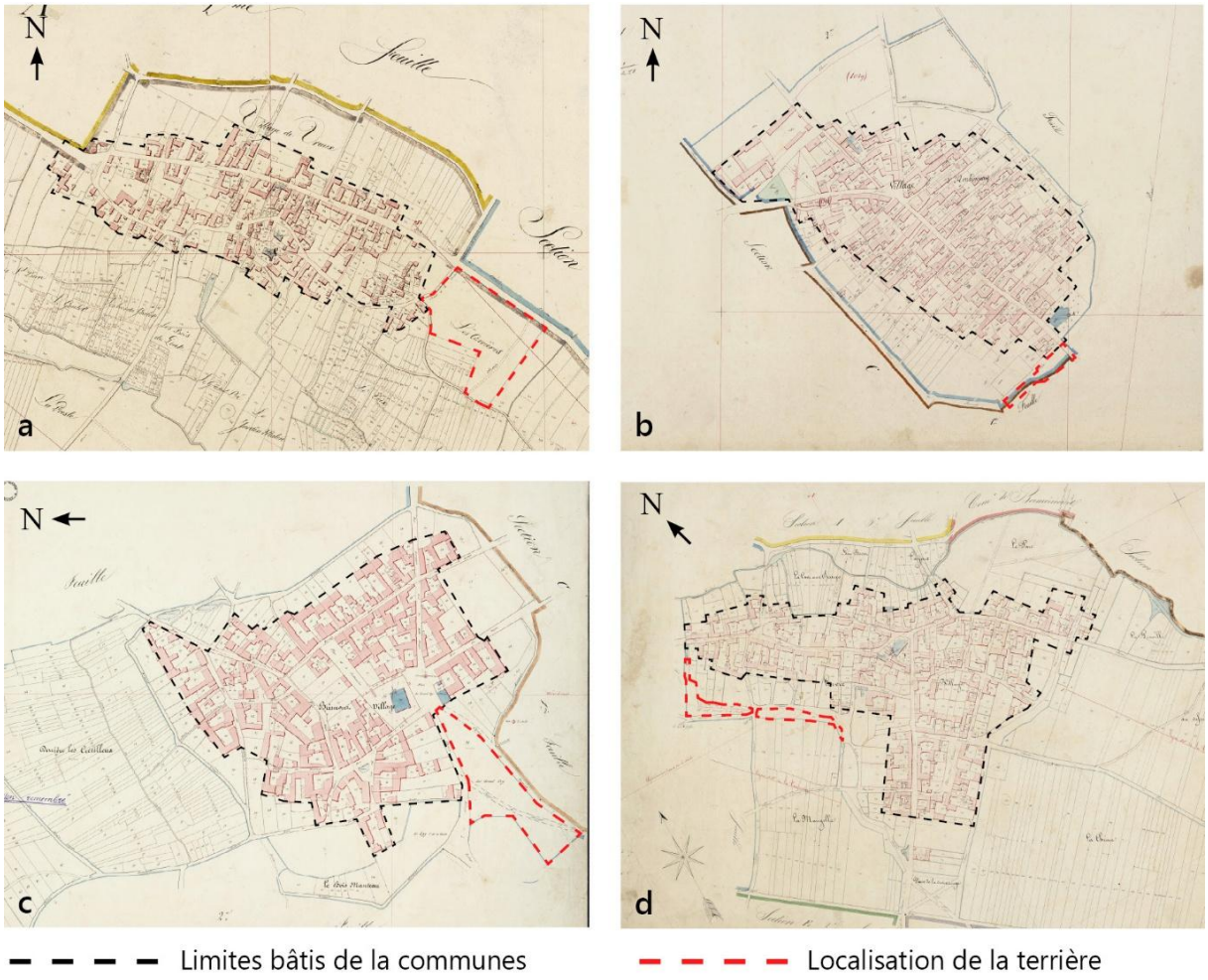
Annexe 49 : Synthèse de l'analyse spatiale des polémo-formes du massif de Brimont à partir du traitement automatique de l'image Lidar (fond *Sky View Factor* dérivé du LiDAR ; Devos et al., 2019b).

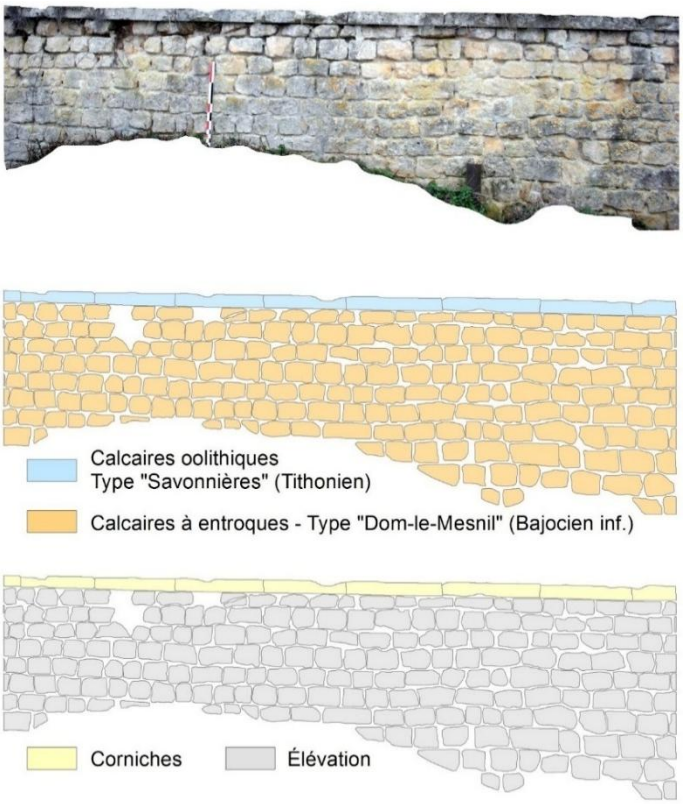


Annexe 50 : Évolution de la ligne de front sur les plateaux de formations cénozoïques après la reprise de la guerre de mouvement au printemps 1918.



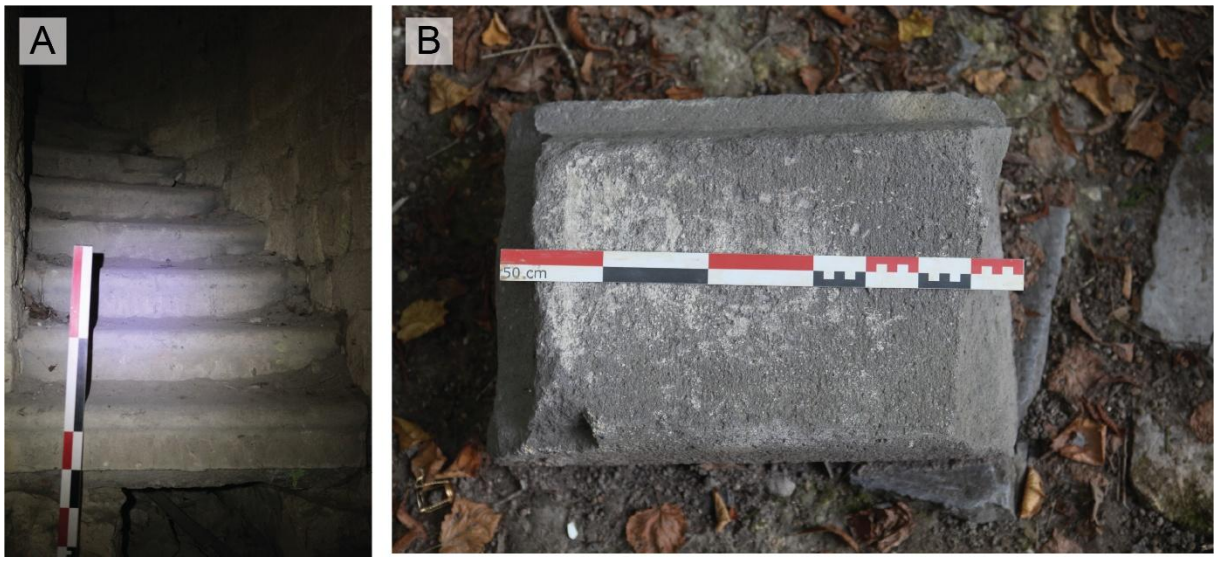
Annexe 51 : Localisation des terrières d'après les cadastres napoléoniens et les états de section associés (Aras-Gaudry, 2025). a : Vraux (1826) ; b : Ambonnay (1827) ; c : Nogent-l'Abbesse ; d : Loivre (1835).



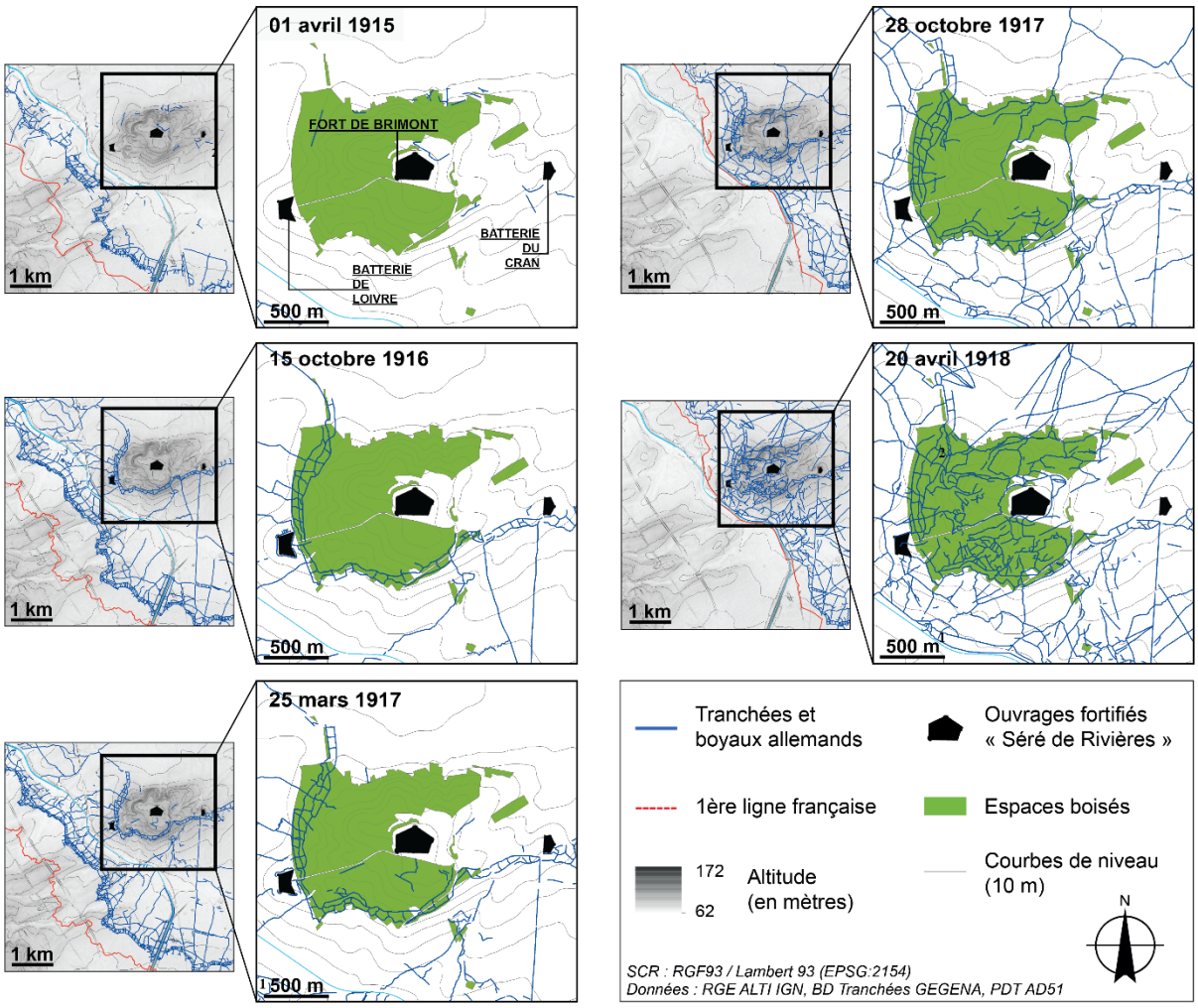


Annexe 52 : Relevé de façade d'une portion du mur de contrescarpe du fort de la Pompelle.

Annexe 53 : Roche basaltique détectée au fort de Saint-Thierry. A : Escalier de fond du casernement ; B : Bloc de basalte isolé au sein de la cour du casernement.



Annexe 54 : Cartographie diachronique des réseaux de tranchées allemandes entre avril 1915 et avril 1918 implantés dans le massif forestier de la butte de Brimont et linéaires et volumes associés.



Date	Linéaire de tranchées (en km)	Densité linéaire (km/ km de front)	Volume de terre déplacée (en m³)
Printemps 1915	4,9	1,2	11 692
Automne 1916	32,6	8,1	69 808
Printemps 1917	35,6	8,9	76 328
Automne 1917	64,2	16,1	135 720
Printemps 1918	82,6	20,7	175 188

Annexe 55 : : Carte postale du fort de Brimont attestant de l'existence d'une passerelle en bois traversant le fossé, par ailleurs corroborée sur des plans directeurs



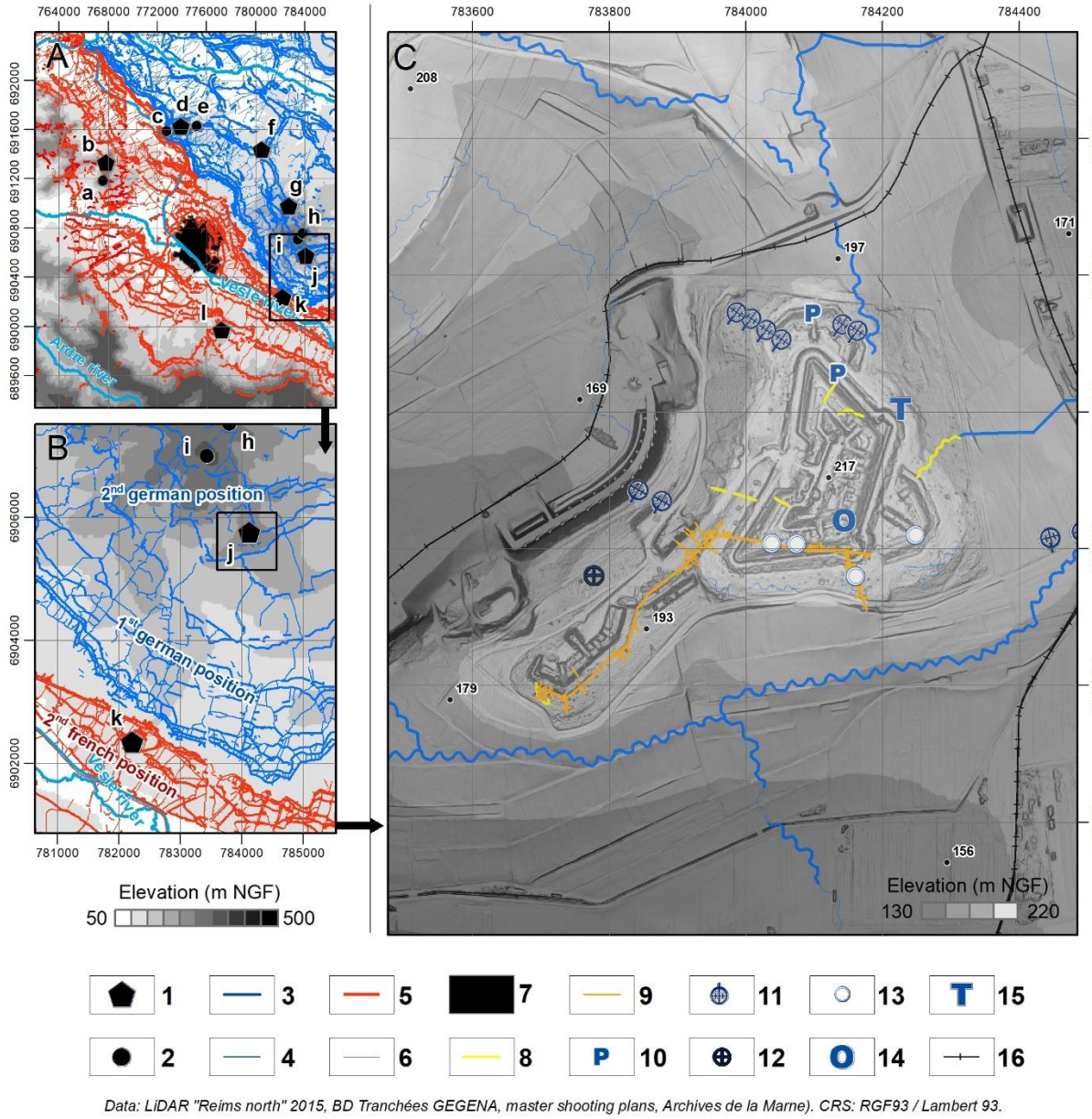
Annexe 56 : Exemples d'utilisation de voies ferrées étroites au sein des forts de Reims. A : Aménagements dans le fossé du fort de Witry-lès-Reims dans le cadre d'un exercice de mines en 1912 (SHD, GR 2 V 120) ; B : Évacuation des déblais lors du creusement du tunnel sous le fort de Nogent-l'Abbesse par l'armée allemande (Spelling, 1917) ; C : Voie étroite au fort de la Pompelle pendant la Première Guerre mondiale (collection Musée de la Pompelle, ville de Reims).







Annexe 57 : Carte des forts dans les réseaux de défense de la Première Guerre mondiale (Ancelin et al., 2023). A et B : Localisation des forts dans les réseaux de tranchées autour de Reims ; C : Système militaire allemand du fort de Nogent-L'Abbesse révélé par la digitalisation du plan directeur de tir français de Beine au 1/20 000 du 10 août 1918.



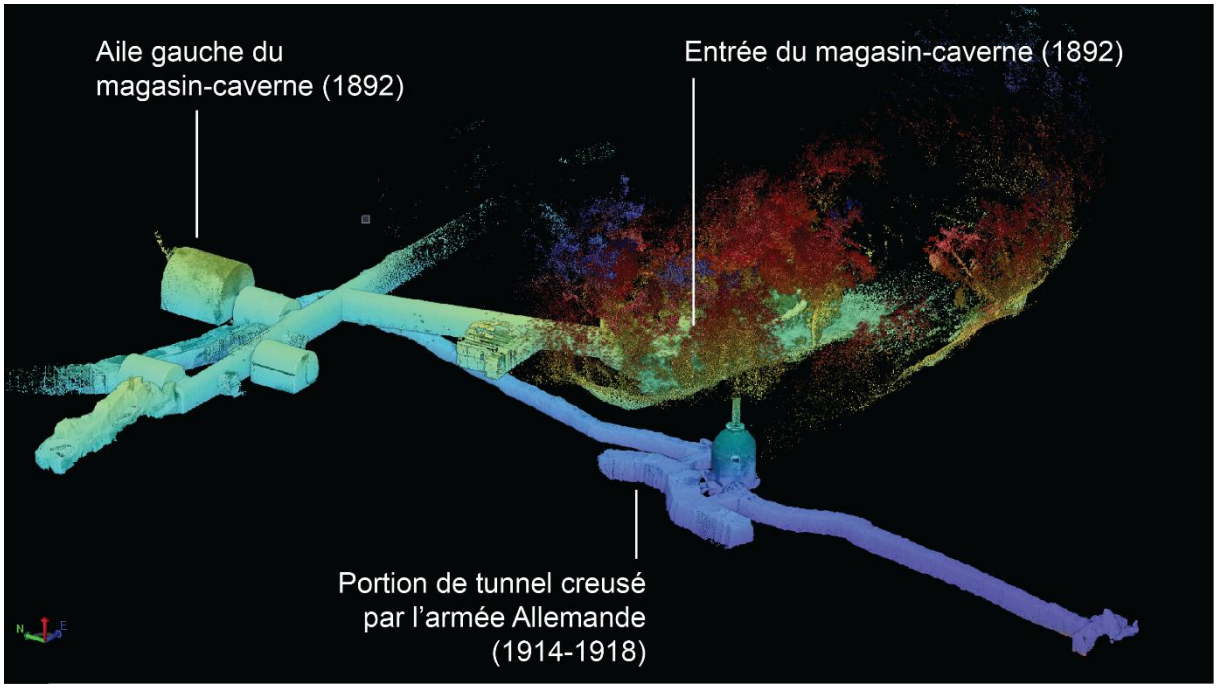
Data: LiDAR "Reims north" 2015, BD Tranchées GEGENA, master shooting plans, Archives de la Marne). CRS: RGF93 / Lambert 93.

1 : Forts Séré de Rivières ; 2 : Ouvrages secondaires Séré de Rivières ; 3 : Tranchées allemandes ; 4 : Boyaux allemands ; 5 : Tranchées françaises ; 6 : Boyaux français ; 7 : Emprise urbaine de Reims en 1918 ; 8 : Boyaux d'accès allemands (LiDAR) ; 9 : Galeries souterraines ; 10 : Passerelles ; 11 : Positions d'artillerie ; 12 : Canon anti-aérien ; 13 : Observatoires ; 14 : Poste optique ; 15 : Poste téléphonique ; 16 : Voies ferrées étroites : a : Réduit de Chenay ; b : Fort de Saint-Thierry ; c : Batterie de Loivre ; d : Fort de Brimont ; e : Batterie du Cran de Brimont ; f : Fort de Fresne ; g : Fort de Witry-lès-Reims ; h : Batterie de Berru ; i : Vigie de Berru ; j : Fort de Nogent-L'Abbesse ; k : Fort de la Pompelle ; l : Fort de Montbré.

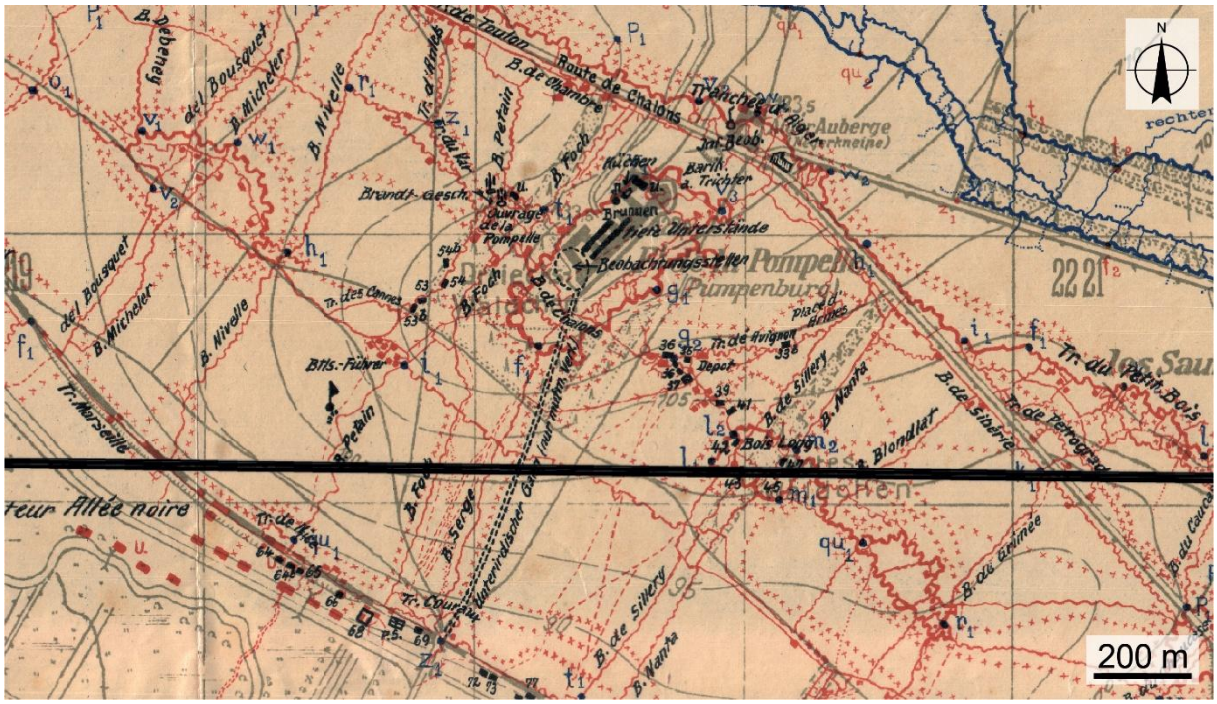
Annexe 58 : Tunnel creusé dans la craie campanienne par les Allemands sous le fort de Nogent-l'Abbesse. A : Creusement du tunnel pendant la guerre (Spelling, 1917) ; Photographie prise en juin 2020 (cl : Alain Devos).



Annexe 59 : Extrait d'un modèle 3D de galeries souterraines du fort de Nogent-l'Abbesse réalisé à partir d'une acquisition LiDAR topographique (source : Hervé Wysocinski, AAFNA).

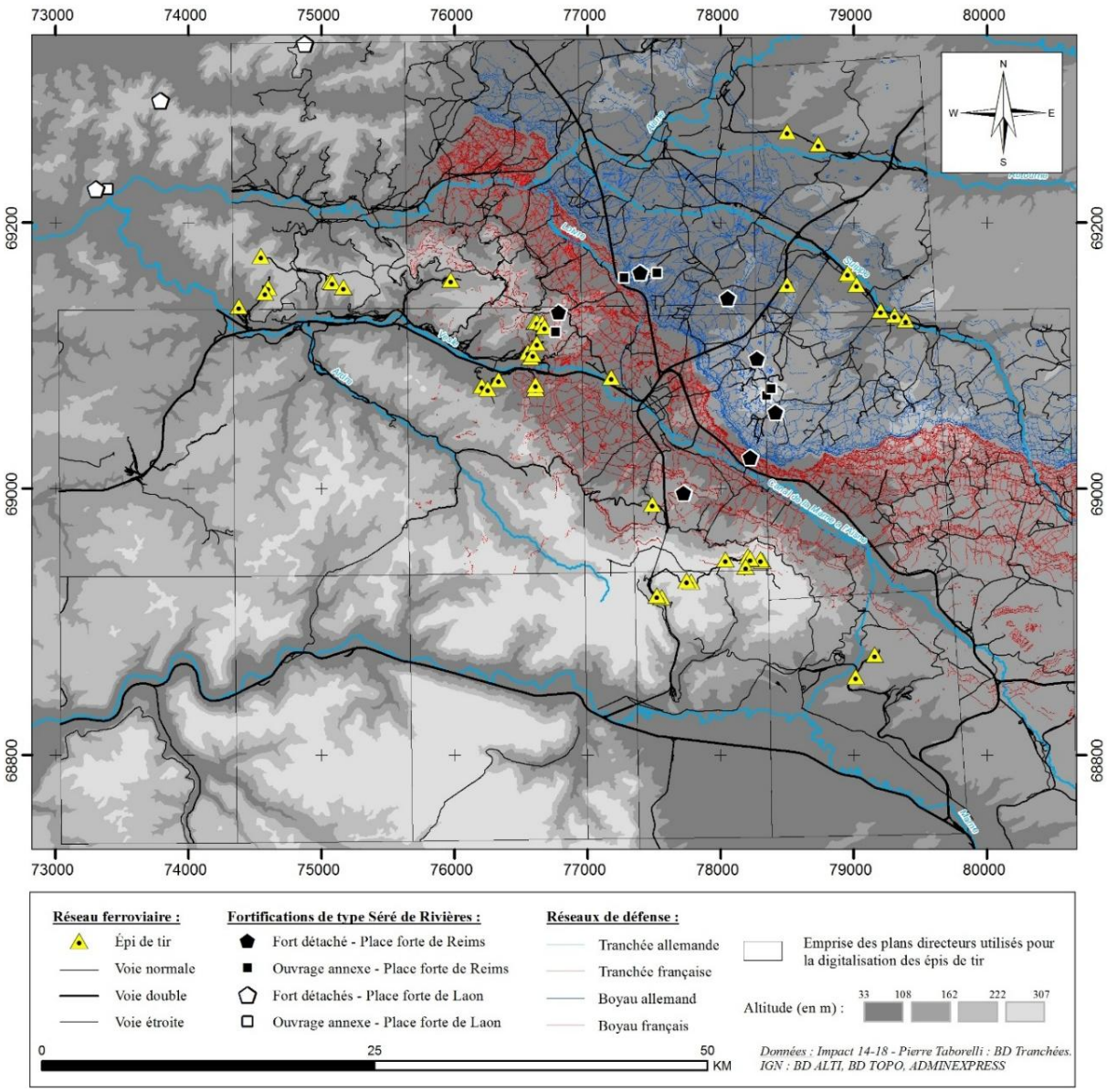


Annexe 60 : *Stellungskarte* du secteur de Puisieulx (sous-secteur Pompelle), réalisé d'après des déclarations de prisonniers (1er mars 1918), représentant le tunnel « métro » desservant le fort, créé et utilisé par l'armée française durant la Première Guerre mondiale (source : Vincent Piniarski).



Annexe 61 : Réseau de voies ferrées et d'épis de tir utilisé par l'ALVF dans le secteur de Reims.

*



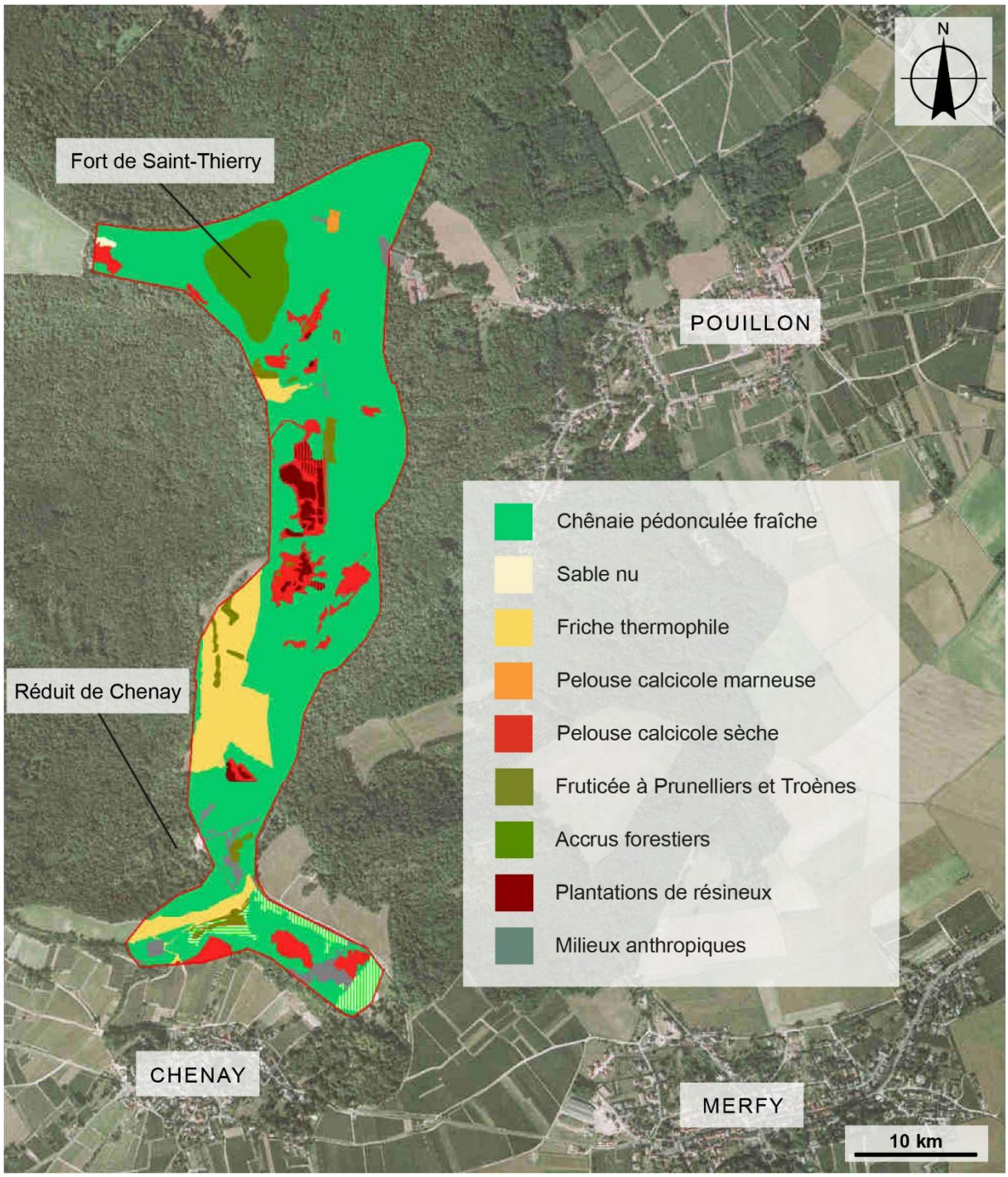
a : Réduit de Chenay ; b : Fort de Saint-Thierry ; c : Batterie de Loivre ; d : Fort de Brimont ; e : Batterie du Cran de Brimont ; f : Fort de Fresne ; g : Fort de Witry-lès-Reims ; h : Batterie de Berru ; i : Vigie de Berru ; j : Fort de Nogent-L'Abbesse ; k : Fort de la Pompelle ; l : Fort de Montbré.

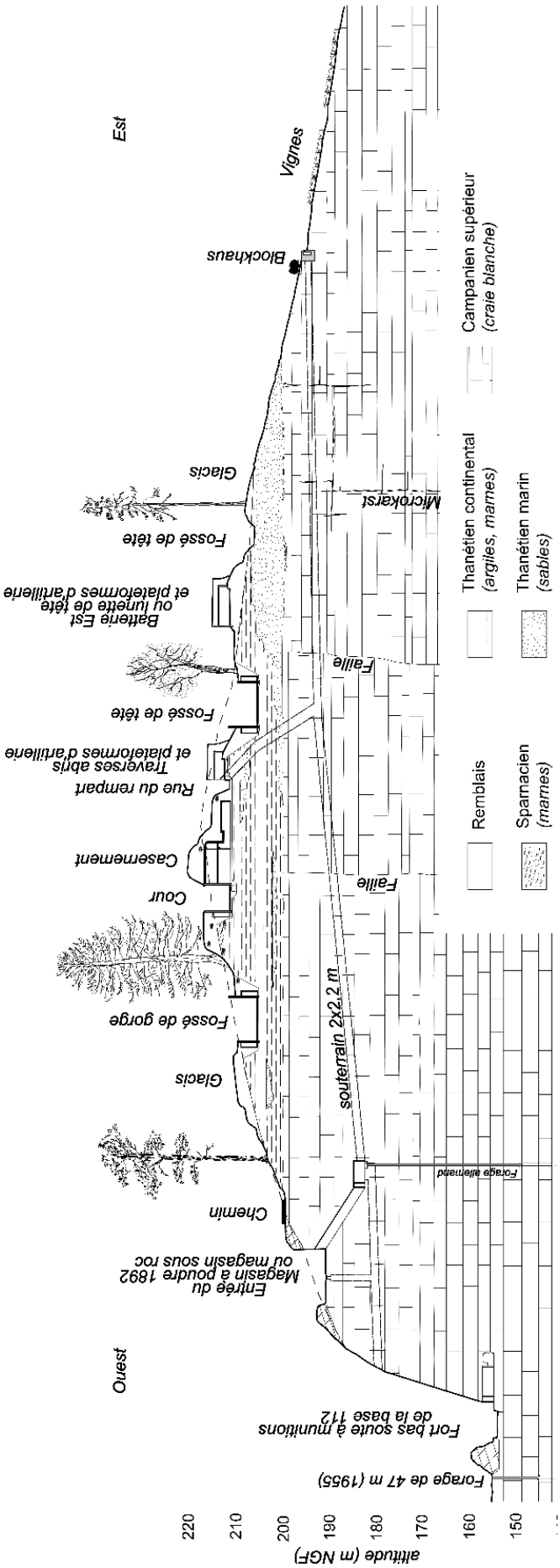
Annexe 62 : Relevé botanique itinérant réalisé au fort de Brimont avec la collaboration de Philippe Laporte.

N°	NOM VERNACULAIRE	GENRE	ESPECE	SOUS ESPECE	FAMILLE	OPTIMUM ECOLOGIQUE			
						LUMIERE	EAU	SOL	AUTRE
1	Arum tacheté ou Gouet	Arum	maculatum		ARACEES	Sciaphile	Mésophile à Mésohygrophile	Neutrophile	Nitrophile
17	Noisetier ou Coudrier	Corylus	avellana		BETULACEES	Sciaphile à semi-sciaphile	Mésophile	Neutrophile à large amplitude	
108	Erable plane	Acer	platanoides		SAPINDACEES	Semi-sciaphile	Mésophile	Neutrophile	
25	Erable sycomore	Acer	pseudoplatanus		SAPINDACEES	Sciaphile à semi-sciaphile	Mésophile	Neutrophile à large amplitude	
	Charme	Carpinus	betulus		BETULACEES	Sciaphile à semi-sciaphile	Mésophile	Neutrophile à large amplitude	
24	Frêne commun	Fraxinus	excelsior		OLEACEES	Héliophile à semi-sciaphile	Mésohygrophile à mésophile	Neutrophile	
9	Aubépine monogyne ou Aubépine à un style	Crataegus	monogyna		ROSACEES	Héliophile à semi-sciaphile	Mésophile à mésoxérophile	Neutrophile à large amplitude	
	Tilleul à larges feuilles	Tilia	platyphyllos		MALVACEES	Sciaphile à semi-sciaphile	Mésophile	Neutrobasophile	
119	Lierre	Hedera	helix		ARALIACEES	Sciaphile à semi-sciaphile	Mésophile	Neutrophile à large amplitude	
	Berce sphondyle	Heracleum	sphondylium	sphondylium	APIACEES	Héliophile à semi-sciaphile	Mésophile à mésohygrophile	Neutrophile	Nitrophile
8	Clématite des haies	Clematis	vitalba		RENONCULACEES	Héliophile à semi-sciaphile	Mésophile à mésoxérophile	Neutrophile à neutrobasophile	
26	Cornouiller sanguin	Cornus	sanguinea	sanguinea	CORNACEES	Héliophile à semi-sciaphile	Mésophile	Neutrobasophile	
99	Sureau noir	Sambucus	nigra		ADOXACEES	Héliophile à semi-sciaphile	Mésophile à mésohygrophile	Neutrophile	Nitrophile
113	Ortie dioïque	Urtica	dioica	dioica	URTICACEES	Héliophile à semi-sciaphile	Mésophile à mésohygrophile	Neutrophile	Nitrophile
	Géranium herbe à Robert	Geranium	robertianum		GERANIACEES	Sciaphile à semi-sciaphile	Mésophile à mésohygrophile	Neutrophile	Nitrophile
90	Benoîte	Geum	urbanum		ROSACEES	Héliophile à semi-sciaphile	Mésophile à mésohygrophile	Neutrophile	Nitrophile
84	Brachypode des bois	Brachypodium	sylvaticum		POACEES	Semi-sciaphile à sciaphile	Mésophile	Neutrophile à neutrobasophile	
5	Troène	Ligustrum	vulgare		OLEACEES	Héliophile à semi-sciaphile	Mésophile à large amplitude	Neutrobasophile à basophile	
20	Robinier	Robinia	pseudoacacia		FABACEES	Héliophile pionnière	Mésophile	Indifférent	
81	Camérisier à balais	Lonicera	xylosteum		CAPRIFOLIACEES	Héliophile à semi-sciaphile	Mésophile	Neutrobasophile à basophile	
117	Orme champêtre	Ulmus	minor		ULMACEES	Héliophile	Mésophile à mésohygrophile	Neutrophile	Nitrophile
	Hêtre	Fagus	sylvatica		FAGACEES	Sciaphile	Mésophile	Indifférent	
22	Rosier des champs	Rosa	arvensis		ROSACEES	Semi-sciaphile	Mésophile	Neutrophile à large amplitude	
	Pâturin des prés	Poa	pratensis	pratensis	POACEES	Héliophile	Mésophile à mésoxérophile	Neutrophile	
6	Cerisier de Sainte-Lucie	Prunus	mahaleb		ROSACEES	Héliophile	Xérophile	Basophile	Thermophile
	Sanicle	Sanicula	europaea		APIACEES	Sciaphile à semi-sciaphile	Mésophile à mésohygrophile	Neutrophile	
101	Noyer	Juglans	regia		JUGLANDACEES	Héliophile à semi-sciaphile	Mésophile à mésohygrophile	Neutrophile	
	Circée de Paris	Circaea	lutetiana		ONAGRACEES	Sciaphile à semi-sciaphile	Mésohygrophile	Neutroacidophile	
	Groseillier rouge	Ribes	rubrum		GROSSULARIACEES	Semi-sciaphile	Mésophile à Mésohygrophile	Neutrophile	
	Fougère mâle	Dryopteris	filix-mas		DRYOPTERIDACEES	Sciaphile	Mésophile à Mésohygrophile	Neutrophile à large amplitude	
	Sceau de Salomon multiflore	Polygonatum	multiflorum		ASPARAGACEES	Sciaphile	Mésophile	Neutrophile à large amplitude	
	Chardon penché	Carduus	nutans	nutans	ASTERACEES	Héliophile	Xérophile	Basophile	
	Chélidoine	Chelidonium	majus	majus	PAPAVERACEES	Semi-sciaphile	Mésophile à Mésohygrophile	Neutrophile	Nitrophile
54	Ivraie vivace ou Ray-grass commun	Lolium	perenne		POACEES	Héliophile	Mésophile à mésoxérophile	Neutrophile à neutrobasophile	
65	Pâturin commun	Poa	trivialis	trivialis	POACEES	Héliophile à semi-sciaphile	Mésophile à mésohygrophile	Neutrophile	
52	Trèfle des prés ou trèfle commun	Trifolium	pratense		FABACEES	Héliophile	Mésophile à Mésoxérophile	Neutrophile	
59	Pâquerette	Bellis	perennis		ASTERACEES	Héliophile	Mésophile	Neutrophile	
	Cerfeuil sauvage ou Anthrisque des bois	Anthriscus	sylvestris	sylvestris	APIACEES	Héliophile à semi-sciaphile	Mésophile à mésohygrophile	Neutrophile	Nitrophile
	Renoncule âcre ou bouton d'or	Ranunculus	acris	acris	RENONCULACEES	Héliophile	Mésophile	Neutrophile	Nitrophile
58	Plantain lancéolé	Plantago	lanceolata		PLANTAGINACEES	Héliophile	Mésohygrophile à mésoxérophile	Neutrophile	
	Liseron des haies	Convolvulus	sepium		CONVOLVULACEES	Héliophile	Mésophile à mésohygrophile	Neutrophile	
112	Gaillet accrocheur	Galium	aparine		RUBIACEES	Héliophile à semi-sciaphile	Mésophile à mésohygrophile	Neutrophile	Nitrophile
	Vigne-vierge	Parthenocissus	inserta		VITACEES	Héliophile	Mésophile à Mésohygrophile	Neutrobasophile	
76	Merisier	Prunus	avium		ROSACEES	Semi-sciaphile	Mésophile	Neutrophile	
	Scolopendre	Asplenium	scolopendrium		ASPLENIACEES	Sciaphile	Mésophile mais préfère une forte hygrométrie de l'air (hygrosciaphile)	Basophile	

	Scolopendre	Asplenium	scolopendrium		ASPLENIACEES	Sciaphile	une forte hygrométrie de l'air (hygrosciaphile)	Basophile	
100	Laîche des bois	Carex	sylvatica	sylvatica	CYPERACEES	Sciaphile	Mésophile	Neutrophile	
	Hypne triquètre	Rhytidiadelphus	triquetrus		HYLOCOMIACEES	Sciaphile à semi-sciaphile	Mésophile	Indifférente au pH	
	Erable champêtre	Acer	campestre		SAPINDACEES	Héliophile à semi-sciaphile	Mésophile à mésoxérophile	Neutrobasophile	
	Mnie ondulée	Plagiomnium	undulatum		MNIACEES	Sciaphile à semi-sciaphile	Mésohygrophile	Neutrophile	Nitrophile
104	Oseille sanguine	Rumex	sanguineus		POLYGONACEES	Semi-sciaphile à sciaphile	Mésohygrophile à hygrophile	Neutrophile	
	Fissident à feuilles d'if	Fissidens	taxifolius		FISSIDENTACEES	Sciaphile	Mésophile à mésohygrophile	Neutrophile à basophile	
	Agrostide capillaire	Agrostis	capillaris		POACEES	Héliophile	Mésophile à xérophile	Neutrophile à acidophile	
79	Fraisier des bois	Fragaria	vesca		ROSACEES	Héliophile à semi-sciaphile	Mésophile	Neutrophile à large amplitude	
80	Viorne obier	Viburnum	opulus		ADOXACEES	Héliophile à semi-sciaphile	Mésophile à mésohygrophile	Neutrophile	
	Capillaire des murailles tétraploïdes	Asplenium	trichomanes	quadrivalens	ASPLENIACEES	Semi-sciaphile	Mésoxérophile	Neutrophile	
	Ronce bleuâtre	Rubus	caesius		ROSACEES	Héliophile à semi-sciaphile	Mésophile à mésohygrophile	Neutrophile à Basophile	
	Ronce des bois	Rubus	fruticosus		ROSACEES	Héliophile	Mésophile	Neutroacidophile	
	Laîche pendante	Carex	pendula		CYPERACEES	Semi-sciaphile	Mésohygrophile à hygrophile	Neutrophile à neutrobasophile	
	Epilobe hérissé	Epilobium	hirsutum		ONAGRACEES	Héliophile à semi-sciaphile	Hygrophile	Neutrophile	
18	Prunellier ou Epine-noire	Prunus	spinosa		ROSACEES	Héliophile à semi-sciaphile	Mésophile à mésoxérophile	Neutrophile	
	Polystic à soies	Polystichum	setiferum		DRYOPTERIDACEES	Sciaphile	Mésophile (mais hygrosciaphile comme la scolopendre)	Neutrophile à large amplitude	

Annexe 63 : Cartographie des habitats naturels du site NATURA 2000 Directive Habitats « Pelouses du Fort de Saint-Thierry, de Chenay et de Merfy » selon la classification des habitats CORINE biotopes (Barré, 2008).



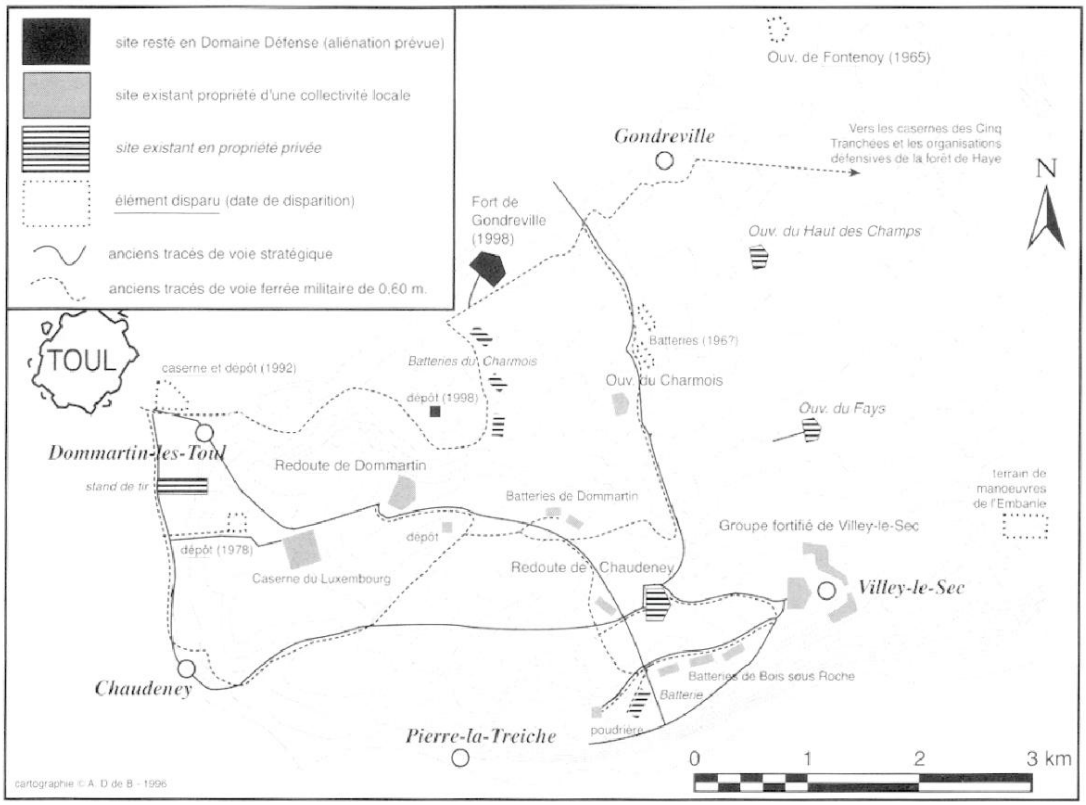


Annexe 64 : Coupe géologique de la butte du fort de Nogent-l'Abbesse réalisée par Jean-Michel Durlet, ingénieur hydrogéologue, membre de l'Association des Amis du Fort de Nogent-l'Abbesse.

Annexe 65 : Fort de Douaumont, trou d'obus de 400 mm (source : ©Ministère de la Culture (France), Médiathèque du patrimoine et de la photographie).



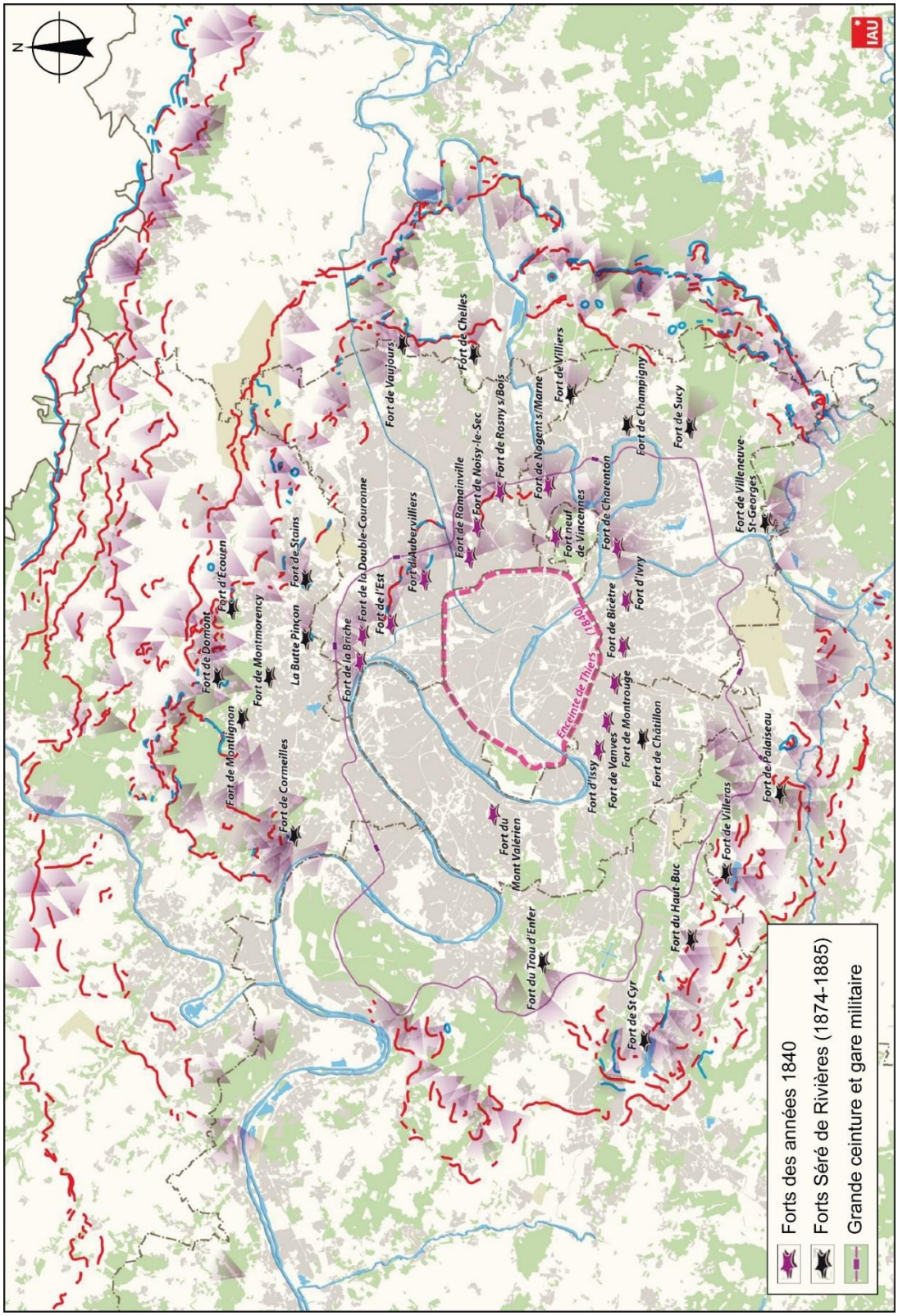
Annexe 66 : Le glissement vers de nouveaux propriétaires à la fin des années 1990 (Durup de Baleine, 1998).



Annexe 67 : Panneau explicatif du parcours d'orientation du fort de Mont-en-Barœul (place de Lille).



Annexe 68 : Double ceinture de forts permanents au sein du camp retranché de Paris (Bardon et al., 2014).



Annexe 69 : Forts de la première tranche Séré de Rivières protégés au titre des monuments historiques.

Nom	Type de protection	Année de protection
Fort de la Pompelle	Classement	1922
Fort de Douaumont	Classement	1970
Fort de Vaux	Classement	1970
Fort de la Repentance	Inscription	1989
Fort de Bois-d'Arcy	Inscription	1991
Fort de Saint-Cyr	Classement	1992
Fort du Mûrier	Inscription	1994
Fort de Troyon	Inscription	1994
Fort de Bessoncourt	Inscription	1995
Fort de Giromagny	Inscription	1995
Fort de Condé-sur-Aisne	Inscription	2001
Fort de Bois l'abbé	Inscription	2002
Fort d'Uxegney	Inscription	2002
Fort d'Asnières	Inscription	2006
Fort de Beauregard	Inscription	2006
Fort de Hauteville	Inscription	2006
Fort de la Motte-Giron	Inscription	2006
Redoute de Saint-Apollinaire	Inscription	2006
Réduit du mont d'Afrique	Inscription	2006
Fort d'Écouen	Classement	2007
Fort de Sennecey	Inscription	2007
Fort de Varois	Inscription	2007
Fort du Cognelot	Inscription	2011

De grandes différences chronologiques existent entre les arrêtés de protection qui concernent principalement des forts situés dans le nord-est de la France. Une accélération de ces procédures et une plus grande variété géographique sont cependant perceptibles depuis les années 2000.

Annexe 70 : Exemple de structure de table attributaire destinée à alimenter une base de données d'inventaire des fortifications étudiées.

	A	B
1	**Identification**	**Morphométrie**
2	ID_fort	Nombre_de_faces
3	Dénomination	Superficie_ha
4	Nom_Boulanger	Rugosité_surface
5	Rôle_dans_système	
6	Secteur_géographique	**Contexte topographique et géologique**
7		Altitude
8	**Organisation militaire**	Substrat_géologique
9	Région_militaire_initiale	Situation_géomorphologique_N1
10	Place_ou_position	Situation_géomorphologique_N2
11	Type_de_fort	
12		**Histoire**
13	**Limites administratives**	Occupation_du_sol_avant
14	Région	Utilisé_pendant_la_guerre
15	Département	
16	Commune	**Situation actuelle**
17		Occupation_du_sol_actuelle
18	**Construction et typologie**	Couverture_arborée
19	Date_début_construction	Distance_agglomération
20	Date_fin_construction	Usage_actuel
21	Durée_construction	État_de_conservation
22	Construction_ex_nihilo	Statut_du_propriétaire
23	Type_fortification	Espace_protégé
24	Génération	Qualité_MNT
25	Type_massif	
26	Nombre_traverses	
27	Bétonné	
28	Cuirassé	
29	Fossé_périphérique	

Annexe 71 : Exemple de Feste allemands de la même génération que les forts Séré de Rivières de type 1874. A : Fort Déroulède (ou fort Kameke) construit au nord-ouest de Metz entre 1876 et 1879 ; B : Première ceinture de la place de Metz construite pendant les décennies 1860-1880 (Burtscher et Hoff, 2009).

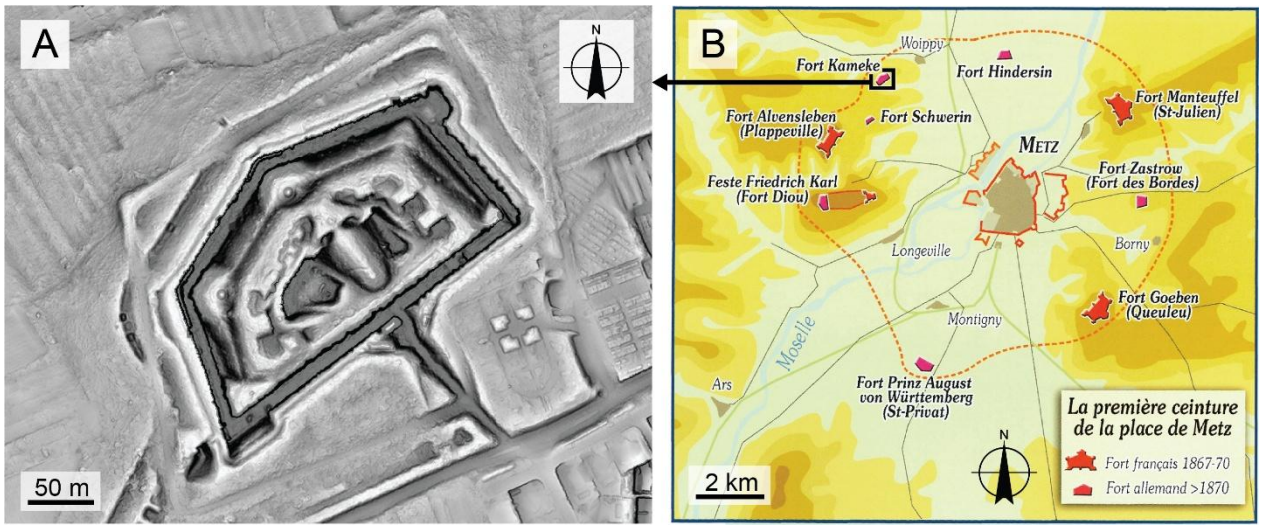


TABLE DES FIGURES

Figure 0.1 : Projets portant entièrement ou partiellement sur l'étude des impacts environnementaux des conflits armés. 27
Figure 0.2 : Exemples de fortifications Séré de Rivières en vue aérienne oblique. 29
Figure 1.1 : Typologie des principaux types de terrains artificiels du BGS et de leur représentation sur la carte géologique. 46
Figure 1.2 : Terrils de Marles-les-Mines constituant un exemple emblématique de terrains artificiels liés à l'industrie. 47
Figure 1.3 : Placement de l'archéogéomorphologie par rapport aux disciplines et sous-disciplines traditionnelles. 48
Figure 1.4 : Fonctionnement du LiDAR aéroporté. 52
Figure 1.5 : Exemples de structures défensives de l'ère préindustrielle visibles au LiDAR. 57
Figure 2.1 : Exemples de fortifications polygonales détachées, édifiées dans la première moitié du XIXe siècle. 63
Figure 2.2 : Premières fortifications construites autour de Paris au XIXe siècle. 64
Figure 2.3 : Jalons de l'histoire de l'artillerie et évolution des plus gros obus destinés à l'attaque de la fortification de 1847 à 1917. 66
Figure 2.4 : Coupe d'une casemate à trois positions d'artillerie de type « Haxo ». 66
Figure 2.5 : Ouvrages de fortification engagés sous le Second Empire (1867-1870), sous la direction du Génie français, alors placé sous l'autorité de Séré de Rivières, et restés inachevés à la veille du conflit franco-prussien. 68
Figure 2.6 : Le réseau de fortification français pendant la guerre de siège en 1870-1871 70
Figure 2.7 : Évolution des limites territoriales de la France au XIXe siècle. 71
Figure 2.8 : Carte des régions militaires instaurées en France à partir de 1873. 74
Figure 2.9 : Évolution de la Zone Frontière où s'appliquent notamment les prérogatives de la CMTP. 75
Figure 2.10 : Évolution du réseau ferroviaire entre 1860 et 1890. 77
Figure 2.11 : Chronologie des réunions du Comité de défense et de la Sous-commission de défense tenues entre 1872 et 1888, recensées d'après les copies des procès-verbaux. 79
Figure 2.12 : Inventaire des forts et ouvrages fortifiés construits et/ou remaniés dans le cadre du système Séré de Rivières à la veille de la Première Guerre mondiale en France métropolitaine. 82
Figure 2.13 : Croquis du système Séré de Rivières devant les frontières nord-est et nord, constituant le cœur du dispositif défensif. 84
Figure 2.14 : Schéma théorique du fonctionnement d'une place forte. 85
Figure 2.15 : Exemples de forts type 1874. 87
Figure 2.16 : Classification par disposition des crêtes d'infanterie et d'artillerie. 88
Figure 2.17 : Plan théorique de l'organisation générale d'un fort Séré de Rivières de première génération. 89
Figure 2.18 : Schémas théoriques d'un fort Séré de Rivières type 1874 à massif central. 91
Figure 2.19 : Structures dédiées à l'action lointaine situées sur la partie interne du parapet. 92
Figure 2.20 : Croquis d'une traverse-abri théorique 92
Figure 2.21 : Caponnière simple type d'un fort de type 1874 93
Figure 2.22 : Transect de l'emploi de la plantation théorisé dans l'instruction de 1877. 94
Figure 2.23 : Étapes de construction d'un fort Séré de Rivières. 96
Figure 2.24 : Affiche relative à l'adjudication des travaux de construction du fort de Villiers. 99
Figure 2.25 : Documents relatifs aux expériences menées sur le fort de la Malmaison suite à la crise de l'obus-torpille. 102

Figure 2.26 : Type de fort employé après 1885. 104
Figure 2.27 : Fort de Douaumont (place de Verdun) dont la maçonnerie d'origine est recouverte d'un béton de renforcement ajouté lors des modernisations postérieures à la crise de l'obus-torpille..... 104
Figure 2.28 : Exemple de « travaux 17 » menés sur des forts autour de Verdun. 108
Figure 3.1 : Cœur du dispositif Séré de Rivières et axe d'invasion central par rapport au système de cuestas du Bassin Parisien. 114
Figure 3.2 : Carte géologique simplifiée des substrats du Mésozoïque et du Cénozoïque, dont Quaternaire, du secteur de Reims. 115
Figure 3.3 : Carte du réseau de talwegs dans le secteur de Reims organisés selon la classification de Strahler. 119
Figure 3.4 : Logs lithostratigraphiques des terrains sédimentaires mésozoïques et cénozoïques de la région de Reims..... 121
Figure 3.5 : Coupes géologiques des plateaux étagés montrant le rôle d'assise du relief de cuesta dans l'organisation de la ceinture fortifiée de Reims..... 122
Figure 3.6 : Contexte paléogéographique de la région de Reims au Thanétien. 124
Figure 3.7 : Carte des conditions de dépôts au Thanétien. 125
Figure 3.8 : Évolution paléogéographique des dépôts lutétiens du secteur de Reims. 128
Figure 3.9 : Diagramme ombrothermique de la station de Reims de la normale 1991-2021. 130
Figure 3.10 : Fluctuations des températures moyennes d'avril à septembre par rapport à la moyenne du XIXe siècle. 131
Figure 3.11 : Écart à la moyenne des précipitations totales annuelles sur la période 1821-1992 de la station d'Épernay. 132
Figure 3.12 : Carte piézométrique de la nappe de la craie en basses eaux. 135
Figure 3.13 : Suivi piézométrique de la nappe de la craie au niveau de la Vesle à Reims , de la Suippe à St-Étienne-sur-Suippe et de leur interfluve à Fresne-lès-Reims du 01/01/2012 au 07/08/2024..... 136
Figure 3.14 : Coupe géologique relative à l'installation d'un bélier hydraulique dans un des puits du fort de Saint-Thierry..... 140
Figure 3.15 : Carton botanique de la feuille de Châlons-sur-Marne de la carte de végétation de la France présentant les grands territoires phytogéographiques. 143
Figure 3.16 : Couverture du sol actuelle du secteur d'étude. 144
Figure 3.17 : Occupation du sol par les formations végétales et les espaces agricoles. 145
Figure 3.18 : Carte des formations végétales naturelles et semi-naturelles de plus de 0,5 ha. 147
Figure 3.19 : Les savarts du camp de Mourmelon..... 148
Figure 3.20 : Carte du gradient de naturalité potentielle de la Champagne et des régions environnantes. 148
Figure 3.21 : Carte du gradient de naturalité potentielle du secteur de la ceinture fortifiée Séré de Rivières de Reims croisée aux emprises des espaces protégés ou inventoriés au titre des ZNIEFF. 151
Figure 3.22 : Orthophotographie de chaque site fortifié..... 152
Figure 3.23 : Zoom sur la couverture du sol des trois sous-secteurs d'un km² isolés au sein du plateau crayeux..... 153
Figure 3.24 : Zoom sur la couverture du sol des trois principaux secteurs d'étude. 154
Figure 3.25 : Extrait de la carte de Cassini du Pays rémois. 159
Figure 3.26 : Occupation du sol supposée de la région de Reims en 1830. 161
Figure 3.27 : Occupation du sol en 1877 des avant-buttes crayeuses utilisées pour la construction des forts de Reims..... 162
Figure 3.28 : Occupation du sol de la butte de Berru dans les années 1750. 164
Figure 3.29 : Occupation du sol de la butte de Berru autour de 1830. 164
Figure 3.30 : Occupation du sol de la butte de Berru dans les années 1870. 165
Figure 3.31 : Extrait de la carte de Cassini représentant le secteur de la butte de Brimont..... 167

Figure 3.32 : Occupation du sol de la butte de Brimont en 1834 reconstituée d'après le cadastre napoléonien. 169
Figure 3.33 : Occupation du sol de la butte de Brimont pendant les années 1830 et 1870..... 169
Figure 3.34 : Occupation du sol du Massif de Saint-Thierry après 1750..... 171
Figure 3.35 : Occupation du sol du Massif de Saint-Thierry dans les années 1830..... 172
Figure 3.36 : Carrières du Massif de Saint-Thierry représentées sur la carte d'État-Major. 173
Figure 3.37 : Occupation du sol du Massif de Saint-Thierry pendant les années 1870..... 174
Figure 3.38 : Inventaire des sites d'extraction indiqué dans l'atlas de Poinsignon..... 176
Figure 3.39 : Enceintes antiques et topographie de *Durocortorum*..... 178
Figure 3.40 : Rempart médiéval de Reims au XIXe siècle..... 180
Figure 3.41 : Frise chronologique des séances du Comité de défense et de la Sous-commission de défense tenues entre 1872 et 1888..... 185
Figure 3.42 : Projet du quadrilatère fortifié de Champagne du général Frossard. 186
Figure 3.43 : Forts projetés mais non réalisés de la place de Reims..... 188
Figure 3.44 : Phases de construction et dates importantes de la place de Reims..... 191
Figure 3.45 : Ouvrages type 1874 de la ceinture de Reims selon le groupe fortifié..... 192
Figure 3.46 : Plan du site de la batterie du Cran de Brimont, avant et après la construction. 193
Figure 3.47 : Occupation du sol en 1874 et tracé de la voie étroite en 1877. 194
Figure 3.48 : Bâtiments temporaires n'apparaissant sur aucun autre document, supposément créés pour la construction du fort de Brimont..... 195
Figure 3.49 : Évolution de l'armement prévu en temps de guerre pour les forts de Reims..... 196
Figure 3.50 : Carte des réseaux de défense dans la région de Reims avant l'offensive allemande du 27 mai 1918. 200
Figure 4.1 : Extrait des plans du fort de Brimont dessiné en aquarelle sous la direction du Lieutenant-Colonel du Génie en chef Lestelles en 1880..... 208
Figure 4.2 : Extrait du tableau de dénombrement de population de la commune de Brimont de 1876.. 215
Figure 4.3 : Extraits des plans issus d'archives judiciaires relatives aux forts de Reims..... 217
Figure 4.4 : Comparaison de l'OCS GE et de CoSIA. 221
Figure 4.5 : Secteur du réduit de Chenay selon les banques de données raster de l'IGN utilisées..... 224
Figure 4.6 : Tableau d'assemblage du Scan 50® historique type 1922. 225
Figure 4.7 : Documents cartographiques datant du XVIIIe siècle utilisés dans l'étude du paysage de guerre rémois et des fortifications Séré de Rivières. 230
Figure 4.8 : Date de levé et de publication des feuilles de la carte de Cassini 231
Figure 4.9 : Documents composant le cadastre napoléonien de chaque commune..... 233
Figure 4.10 : Effectif de communes en fonction de l'année de levée du cadastre napoléonien dans la région de Reims..... 234
Figure 4.11 : Dates de levé du cadastre napoléonien des communes de la région de Reims..... 235
Figure 4.12 : Documents cartographiques datant du XIXe siècle utilisés dans l'étude du paysage de guerre rémois et des fortifications Séré de Rivières. 236
Figure 4.13 : Emprise et date de levé des feuilles de la carte d'État-Major..... 238
Figure 4.14 : Extrait de la feuille Reims NO de la carte d'État-Major sur laquelle apparaissent le canal de l'Aisne à la Marne (1866) et la ligne de chemin de fer Reims-Laon (1857), alors que la carte est théoriquement réalisée en 1825-1826 et 1831..... 238
Figure 4.15 : Documents cartographiques et planimétriques relatifs à la Première Guerre mondiale utilisés dans l'étude du paysage de guerre rémois et des fortifications Séré de Rivières. 240
Figure 4.16 : Comparaison des informations relatives au secteur du fort de la Pompelle sur les plans directeurs au 1/20 000, 1/ 10 000 et 1/5 000..... 241
Figure 4.17 : Tableaux d'assemblage des plans directeurs de tir produits au 1/20 000 et 1/10 000 pendant la Première Guerre mondiale..... 243

Figure 4.18 : Comparaison d'un plan directeur et d'une photographie aérienne..... 246
Figure 4.19 : Cliché orienté nord de la partie méridionale du Mont de Berru, à l'ouest de Nogent-l'Abbesse, pris le 29/04/1915. 247
Figure 4.20 : Emprises des photographies aériennes verticales de la Première Guerre mondiale géoréférencées..... 248
Figure 4.21 : Photographies aériennes de la côte de Meuse au nord-ouest de Toul..... 250
Figure 4.22 : Diagramme de la suite d'opérations mise en place pour le traitement des données LiDAR aéroportées spécifiques à l'archéologie. 254
Figure 4.23 : Localisation des données LiDAR aéroportées.LiDAR 256
Figure 4.24 : Fort de Saint-Thierry situé sur la commune de Pouillon. 258
Figure 4.25 : Comparaison de l'orthophotographie et de la carte de densité de points « sol » du LiDAR IMPACT 14-18 du Mont de Brimont et du Mont de Berru. 259
Figure 4.26 : Localisation des points reclassés manuellement sur la dalle LIDAR HD du fort de la Pompelle. 260
Figure 4.27 : Schéma théorique de l'interpolation d'un nuage de points brut en MNT. 262
Figure 4.28 : Traitements de visualisation utilisés dans l'étude des polémoformes Séré de Rivières..... 265
Figure 4.29 : Suite d'opérations effectuée dans l'exploitation des traitements de visualisation afin de détecter puis cartographier les anomalies topographiques..... 269
Figure 4.30 : MNT LIDAR HD traité visuellement via la superposition d'un indice de pente et d'un LRM en transparence. Il s'agit de la combinaison de traitements de visualisation la plus utilisée dans cette thèse. 269
Figure 4.31 : Exemple de croisement documentaire. 271
Figure 4.32 : Schéma théorique du géoréférencement d'un fichier raster. 273
Figure 4.33 : Processus d'intégration du cadastre napoléonien au SIG. 274
Figure 4.34 : Protocole de digitalisation des morphologies Séré de Rivières associées au fort de type 1874 relatives à la défense rapprochée et constituant des invariants morphologiques. 277
Figure 4.35 : Protocole de digitalisation des morphologies Séré de Rivières associées au fort de type 1874 relatives à l'action lointaine et constituant des invariants morphologiques. 278
Figure 4.36 : Protocole de digitalisation des rampes constituant la seule catégorie de particularisme morphologique relative à l'action lointaine. 278
Figure 4.37 : Protocole de digitalisation des morphologies Séré de Rivières associées au fort de type 1874 relatives à la défense rapprochée et constituant des particularismes morphologiques..... 279
Figure 4.38 : Protocole de digitalisation des polémoformes de la Première Guerre mondiale. 280
Figure 4.39 : Protocole de digitalisation des anomalies topographiques non directement affiliées à la guerre. 281
Figure 4.40 : Figures théoriques des indices de rugosité utilisés dans l'étude de l'hétérogénéité du terrain des morphologies Séré de Rivières. 285
Figure 4.41 : Caractéristiques théoriques du rempart et du fossé d'un fort de type 1874. 286
Figure 4.42 : Processus de production des distributions des valeurs de pente. 287
Figure 4.43 : Extraits de documents cartographiques et planimétriques représentant la topographie anté-construction du fort de Nogent-l'Abbesse. 288
Figure 4.44 : Processus de reconstitution de la topographie initiale sous SIG. 289
Figure 4.45 : Fonctionnement de l'outil « Remblais déblais » sur ArcGIS 10.3. 290
Figure 4.46 : Le cycle des géomatériaux du bâti. 294
Figure 4.47 : Synthèse de la méthodologie employée dans l'étude des géomatériaux. 297
Figure 4.48 : Échelle de classification des approvisionnements en pierre en fonction de la distance entre le site d'extraction et le site d'emploi du matériau. 299
Figure 4.49 : Extrait du répertoire des carrières de pierre de taille exploitées en 1889 où est mentionné l'emploi de la pierre de « Dom-le-Menil » dans la construction des forts de Reims. 300

Figure 4.50 : Levé LiDAR terrestre des structures souterraines du fort de Montbré nettoyé et sous-échantillonné et MNT LIDAR HD. 301
Figure 4.51 : Itinéraire de l'inventaire botanique et types de stations étudiés sur le fort de Brimont le 12 juillet 2022..... 303
Figure 4.52 : Exemples d'espèces végétales photographiées sur le fort de Nogent-l'Abbesse en juin 2022 pour constituer un herbier numérique aidant à l'interprétation des taxons. 304
Figure 5.1 : Inventaire global des formes cartographiées dans le secteur du Massif de Saint-Thierry..... 311
Figure 5.2 : Inventaire global des formes cartographiées dans le secteur du Mont de Brimont..... 312
Figure 5.3 : Inventaire global des formes cartographiées dans le secteur du Mont de Berru. 313
Figure 5.4 : Inventaire global des formes cartographiées dans les trois sous-secteurs individuels..... 314
Figure 5.5 : Plan théorique de l'organisation générale d'un fort Séré de Rivières de type 1874. 316
Figure 5.6 : Plans schématiques des forts Séré de Rivières de Reims. 318
Figure 5.7 : Reproduction du plan d'ensemble au 1/1 000 de la batterie du Cran de Brimont..... 321
Figure 5.8 : Emprise de l'enceinte et de la crête d'artillerie des forts de Reims. 321
Figure 5.9 : Profils d'origine du fort de Brimont et de la batterie de Loivre. 322
Figure 5.10 : Classement statistique des forts Séré de Rivières de la ceinture de Reims selon quatre variables. 323
Figure 5.11 : Analyse en composantes principales réalisée sur cinq paramètres utilisés pour qualifier la morphologie globale des forts de Reims. 325
Figure 5.12 : Classification ascendante hiérarchique relative aux paramètres morphométriques des forts de Reims. 326
Figure 5.13 : Forts de la ceinture de Reims. 328
Figure 5.14 : Corrélation entre les valeurs de rugosité de terrain de chaque fort calculées selon deux méthodes (TRI ; RgI)..... 329
Figure 5.15 : Coupes topographiques du rempart et du fossé des forts Séré de Rivières de la ceinture de Reims..... 331
Figure 5.16 : Morphologies du rempart du fort de Brimont..... 332
Figure 5.17 : Synthèse des diagrammes de distribution des valeurs de pente des forts de Reims. 334
Figure 5.18 : Reconstitution de la topographie initiale du site de la batterie de Loivre..... 336
Figure 5.19 : Estimation volumétrique des espaces remblayés et déblayés des forts de Reims de la série G2. 337
Figure 5.20 : Volumes bouleversés et proportions de matériaux exogènes des sept fortifications encore nettement perceptibles au LiDAR. 338
Figure 5.21 : Morphologies de la batterie de Berru. 338
Figure 5.22 : Inventaire des morphologies internes aux forts Séré de Rivières de la ceinture de Reims les plus lisibles..... 341
Figure 5.23 : Exemple d'un terre-plein et des polémoformes associées au fort de Montbré..... 342
Figure 5.24 : Exemples de traverses-abris. 344
Figure 5.25 : Typologie morphologique des traverses-abris. 345
Figure 5.26 : Traverses-abris coudées du fort de Brimont..... 345
Figure 5.27 : Exemples de traverses à étages. 346
Figure 5.28 : Typologie des rampes droites et simples selon le mode de construction. 348
Figure 5.29 : Autres types de rampes selon la forme et l'organisation..... 348
Figure 5.30 : MNT de la rue du rempart du fort de Brimont..... 349
Figure 5.31 : MNT de la rue des remparts des forts du groupe G2. 351
Figure 5.32 : Exemples de rues du rempart et de cours du casernement et d'un casernement donnant sur la gorge des forts de la ceinture de Reims. 352
Figure 5.33 : Morphologies du rempart du front de tête du fort de Montbré..... 353
Figure 5.34 : Exemple du glacis du réduit de Chenay..... 355

Figure 5.35 : Fossés des forts de la ceinture de Reims présentés à partir du MNT LIDAR HD traité visuellement et de photographies horizontales..... 358
Figure 5.36 : MNT du fossé des forts de la série G2..... 359
Figure 5.37 : Mur de contrescarpe maçonné et grille défensive sommitale face à la caponnière simple du réduit de Chenay..... 360
Figure 5.38 : Typologie des murs d'escarpe selon Simoutre (1889)..... 361
Figure 5.39 : Escarpe demi-détachée du fort de Montbré..... 362
Figure 5.40 : Fossé et de la face 1-2 et lunette nord du fort de Nogent-l'Abbesse..... 363
Figure 5.41 : Affleurements rocheux dans le fossé..... 364
Figure 5.42 : Mur de contrescarpe du fort de Saint-Thierry..... 365
Figure 5.43 : Photographies anciennes du fort de Brimont montrant un mur d'escarpe tantôt attaché, tantôt détaché..... 366
Figure 5.44 : Mur de contrescarpe à arceaux de décharge en face de la caponnière double du fort de Nogent-l'Abbesse..... 367
Figure 5.45 : Caponnières d'ouvrages de la ceinture de Reims présentés à partir du MNT LIDAR HD traité visuellement et de photographies horizontales..... 370
Figure 5.46 : Caponnière double d'épaule du fort de Brimont..... 371
Figure 5.47 : Photographies horizontales de la caponnière de gorge à double étage du fort de Saint-Thierry..... 372
Figure 5.48 : Bonnettes du front de tête..... 374
Figure 5.49 : MNT LIDAR HD des ravelins des forts de la ceinture de Reims..... 375
Figure 5.50 : Pont d'accès du fort de Montbré..... 376
Figure 5.51 : Exemples de massifs centraux des forts de Reims..... 377
Figure 5.52 : Emplacements schématiques du casernement et des magasins à poudre de chaque fort de la ceinture de Reims..... 378
Figure 5.53 : Exemples de magasins à poudre des forts de Reims..... 380
Figure 5.54 : Exemples de casernements dans les forts de la ceinture de Reims..... 381
Figure 5.55 : Coupe transversale en aquarelle du casernement du fort de Brimont..... 381
Figure 5.56 : Croquis d'exécution de la batterie de Loivre de 1877..... 382
Figure 5.57 : Casemates à tir indirect du fort de Brimont..... 383
Figure 5.58 : Magasins sous roc (ou magasins-cavernes) de la ceinture de Reims..... 384
Figure 5.59 : Inventaire des morphologies internes aux forts Séré de Rivières de la ceinture de Reims les moins lisibles..... 385
Figure 5.60 : Traverses démantelées de la batterie de Berru..... 386
Figure 5.61 : Signature morphologie de la source Rouby de la batterie de Berru..... 388
Figure 5.62 : Profil et croquis de tranchée en 1915..... 391
Figure 5.63 : Exemple de tranchées sur la butte de Brimont..... 391
Figure 5.64 : Typologie des tranchées et boyaux inventoriés à partir des données LiDAR..... 393
Figure 5.65 : Diagrammes de distribution des orientations moyennes des tranchées et boyaux..... 393
Figure 5.66 : Exemple de tranchée représentée en tant que ligne téléphonique souterraine sur le plan directeur des GCTA..... 394
Figure 5.67 : Détermination du taux d'effacement des tranchées de la Grande Guerre par la comparaison des plans directeurs des GCTA et des données LIDAR HD..... 395
Figure 5.68 : Ensemble des traces morphologiques de voies étroites inventoriés sur le Mont de Berru. 396
Figure 5.69 : Photographies relatives aux voies étroites de la Première Guerre mondiale..... 397
Figure 5.70 : Typologie des infrastructures de voies ferrées normales dont les différentes morphologies présentées sont transposables aux voies étroites..... 398
Figure 5.71 : Profils en travers de la plateforme selon l'écartement de la voie ferrée..... 398
Figure 5.72 : Exemple d'épaulement d'origine militaire situé en milieu agricole..... 399

Figure 5.73 : Emplacements de *Minenwerfer* situés à contrepente d'un petit relief au sud-est de la butte de Brimont. 401
Figure 5.74 : Exemples de structures caractérisées lors des prospections pédestres. 401
Figure 5.75 : Exemples de cantonnements révélés par le LiDAR dans les secteurs de la butte de Berru et du Massif de Saint-Thierry. 402
Figure 5.76 : Creutes d'Hermonville-Marzilly : indices morphologiques et intégration aux réseaux de défense. 403
Figure 5.77 : Signatures morphologiques relatives à une batterie française de quatre canons dans le Massif de Saint-Thierry. 404
Figure 5.78 : Batterie d'artillerie dont la morphologie est complexifiée par l'existence d'un boyau de communication et d'abris annexes. 405
Figure 5.79 : Batterie de campagne à tir tendu à deux emplacements sur le flanc ouest de la butte de Brimont. 406
Figure 5.80 : Batterie d'artillerie lourde, à trois emplacements partiellement connectés par un boyau, au sommet de la butte de Brimont. 406
Figure 5.81 : Exemples de positions d'artillerie selon le degré de complexité morphologique et spatial LIDAR HDtraité visuellement. 407
Figure 5.82 : Diagramme d'orientation des positions d'artillerie répertoriées. Les orientations correspondent à l'axe central des polémoformes. 408
Figure 5.83 : Caractéristiques théoriques des cratères d'obus. 409
Figure 5.84 : Paramètres de formation d'un trou d'obus en fonction de l'angle de pénétration du projectile. 410
Figure 5.85 : Organisation de cratères d'obus dans le cadre d'un tir de barrage. 411
Figure 5.86 : Exemple de secteur ayant subi une « bombturbation ». 411
Figure 5.87 : Inventaire LiDAR des polémoformes de la Première Guerre mondiale dans le secteur du Massif de Saint-Thierry. 413
Figure 5.88 : Inventaire LiDAR des polémoformes de la Première Guerre mondiale dans le secteur de la butte de Brimont. 415
Figure 5.89 : Inventaire LiDAR des polémoformes de la Première Guerre mondiale dans le secteur de la butte de Berru. 417
Figure 5.90 : Inventaire global des formes cartographiées des sites des forts de la Pompelle et de Montbré. 418
Figure 5.91 : Typologie des polémoformes de la Grande Guerre observées sur le secteur d'étude. 421
Figure 5.92 : Types de carrières à front de taille. 424
Figure 5.93 : Carrière à fosses d'extraction sur le Mont de Berru. 424
Figure 5.94 : Autres types de carrières situées sur le Mont de Berru constituant des exceptions morphologiques. 425
Figure 5.95 : Inventaire des carrières du Mont de Berru selon le type de morphologie. 426
Figure 5.96 : Inventaire des carrières du Mont de Berru selon le type de géomatériaux exploité. 428
Figure 5.97 : Fosses d'extraction de meulière supposées dans le bois de Witry. 429
Figure 5.98 : Secteur d'extraction morphologiquement complexe, situé à la base des sables cuisiens. 429
Figure 5.99 : Signature morphologique correspondant à une terrière si aucune extraction rocheuse postérieure n'a eu lieu. 430
Figure 5.100 : Emprise spatiale des sites d'extraction de géomatériaux de la Côte du Moulin à Berru. 430
Figure 5.101 : Inventaire des carrières du Mont de Brimont selon le type de morphologie et de géomatériaux exploité. 432
Figure 5.102 : Sablière à front de taille unique de la butte de Brimont. 433
Figure 5.103 : Sablière du Belvédère au sud de la butte de Brimont. 433
Figure 5.104 : Terrière du Mont-Ronin. 434

Figure 5.105 : Inventaire des carrières du Massif de Saint-Thierry selon les types de morphologie et de géomatériaux exploités. 436
Figure 5.106 : Affleurements de calcaires lutétiens dans le fossé du fort de Saint-Thierry. 436
Figure 5.107 : Signatures morphologiques relatives à l'extraction de calcaire sur le Massif de Saint-Thierry. 438
Figure 5.108 : Évolution de l'activité extractive calcaire d'après les sources cartographiques et photographiques. 439
Figure 5.109 : Comparaison de deux secteurs à épaulements 442
Figure 5.110 : Inventaire cartographique des épaulements, fossés et levées de la butte de Brimont. 443
Figure 5.111 : Inventaire cartographique des épaulements du Massif de Saint-Thierry 444
Figure 5.112 : Inventaire cartographique des fossés de la butte de Berru. 445
Figure 5.113 : Inventaire cartographique des fossés de la butte de Berru. 446
Figure 5.114 : Exemples d'organisation de drains. 446
Figure 5.115 : Inventaire cartographique des fossés du Massif de Saint-Thierry 447
Figure 5.116 : Levé topographique de grande envergure sur le plateau sommital du Massif de Saint-Thierry. 448
Figure 5.117 : Levée topographique de grande envergure sur le flanc de la butte de Brimont. 449
Figure 6.1 : Évolution des surfaces et volumes bouleversés liés à la construction de fortifications Séré de Rivières de Reims. 454
Figure 6.2 : Géomatériaux cohérents utilisés pour la construction du fort de Nogent-l'Abbesse. 456
Figure 6.3 : Diagramme de provenance des géomatériaux de construction cohérents recensés dans les forts de Reims 458
Figure 6.4 : Coupe du remblai utilisé pour le massif central du fort de Saint-Thierry. 460
Figure 6.5 : Coupe topographique du fort de Montbré et vue en 2,5D de la caponnière double de tête, réalisées via des données LiDAR aéroportées et des relevés LiDAR terrestres. 461
Figure 6.6 : Photographies du fort de Brimont attestant de la présence d'arbres disposés en quinconce sur le glacis. 463
Figure 6.7 : Plantations résineuses du glacis révélées par des photographies aériennes militaires de 1915. 464
Figure 6.8 : Fossé du fort de Witry-lès-Reims en 1912. 464
Figure 6.9 : Alignement de marronniers sur le glacis du réduit de Chenay révélé par la photographie aérienne et la prospection pédestre. 465
Figure 6.10 : Topographie des sites de construction des forts de Reims 467
Figure 6.11 : Positionnement des forts du Mont de Berru par rapport à leur environnement topographique. 467
Figure 6.12 : Traces de la voie ferrée étroite du Mont de Berru créé par l'entrepreneur Lancesseur. 470
Figure 6.13 : Bâtiments temporaires supposément créés pour la construction du fort de Brimont. 470
Figure 6.14 : Fosses d'extraction de meulière de Leuvrigny liées à la construction des fortifications de la butte de Berru. 471
Figure 6.15 : Extraits de plans directeurs des GCTA au 1/20 000 le plus récent au droit de chaque fort de Reims. 474
Figure 6.16 : *Stellungskarte* représentant le système spatial militaire allemand en 1917 (source : Bundesarchiv). 475
Figure 6.17 : Typologie morphologique, spatiale et fonctionnelle des fossés militaires situés dans l'environnement des forts Séré de Rivières. 476
Figure 6.18 : Exemples d'indices photographiques et cartographiques d'intégration des forts aux réseaux de défense de la Grande Guerre. 476
Figure 6.19 : Travaux d'intégration aux réseaux de défense allemands réalisés au fort de Brimont. 477

Figure 6.20 : Travaux d'intégration aux réseaux de défense allemands réalisés au fort de Nogent-l'Abbesse. 478
Figure 6.21 : Casemate bétonnée française située au sommet du rempart du fort de Montbré. 479
Figure 6.22 : Casemate bétonnée allemande située au sommet du rempart de la batterie de Berru. 480
Figure 6.23 : Emplacements d'artillerie placés en contrepente du glacis du fort de Saint-Thierry. 481
Figure 6.24 : Épis de tir terminaux du vallon de Trigny..... 481
Figure 6.25 : Inventaire des cratères d'obus sur les principaux forts pilonnés pendant la Première Guerre mondiale..... 482
Figure 6.26 : Photographie aérienne oblique du fort de la Pompelle de mai 1917. 483
Figure 6.27 : Photographie aérienne oblique de la batterie de Loivre d'avril 1917. 483
Figure 6.28 : Typologie des cratères d'obus affectant les polémoformes Séré de Rivières..... 484
Figure 6.29 : Désordres géotechniques aux forts de Brimont et Nogent-l'Abbesse causé par des tirs d'artillerie. 485
Figure 6.30 : Diagrammes de distribution des diamètres des cratères d'obus des forts les plus pilonnés pendant la Première Guerre mondiale : Brimont et Nogent-l'Abbesse 486
Figure 6.31 : Ceinture fortifiée de Reims selon le degré d'effacement entre les polémoformes les plus effacées et celles encore lisibles. 488
Figure 6.32 : Exemples de réaffectations fonctionnelles corrélatives à un effacement limité de la topographie d'un fort Séré de Rivières de la ceinture de Reims. 490
Figure 6.33 : Coupe transversale du projet de remise en place des remblais après la consolidation du plafond du casernement. 491
Figure 6.34 : Évolution du comblement du fort de Witry-lès-Reims..... 492
Figure 6.35 : Photographies relatives aux facteurs d'effacement des polémoformes Séré de Rivières..... 494
Figure 6.36 : Exemple de modifications militaire et polémologique postérieures à la Première Guerre mondiale au fort de Nogent-l'Abbesse. 495
Figure 6.37 : Régularisation des pentes du fossé du fort de Nogent-l'Abbesse. 498
Figure 6.38 : Photographie aérienne oblique du Massif de Brimont du 12 avril 1917 Altitude de prise de vue 1 100 mètres. 502
Figure 6.39 : Extrait de la feuille Reims NO de la carte spéciale des régions dévastées éditée en 1920. . 503
Figure 6.40 : Carte de l'occupation du sol de la butte de Brimont issue de la photo-interprétation de photographies aériennes verticales. 504
Figure 6.41 : Coupe géologique et transect de végétation de la butte de Brimont. 505
Figure 6.42 : Transect de la végétation du fossé du fort de Brimont. 507
Figure 6.43 : Cartographie des habitats naturels du fort de la Pompelle. 508
Figure 6.44 : Coupe géologique et transect de végétation de la butte de Nogent-l'Abbesse. 509
Figure 6.45 : Exemples des forts de Montbré, la Pompelle et Nogent-l'Abbesse favorisant une continuité écologique en « pas japonais » entre la butte de Berru et la Montagne de Reims. 510
Figure 6.46 : Extrait de la carte des composantes de la trame verte et bleue de Champagne-Ardenne au 1/100 000e du Schéma Régional de Cohérence Ecologique..... 511
Figure 6.47 : Dépôt d'obus dans les remblais au fort de Nogent. 512
Figure 6.48 : Ensemble de tranchées de reconstitution historique situées sur le glacis du fort de Montbré. 515
Figure 6.49 : Exercices de mines à double action des forts de Witry-lès-Reims et Brimont ayant créé de multiples cratères aujourd'hui comblés. 516
Figure 6.50 : Phases polémologiques morphogènes révélées au LiDAR ayant abouti à la polémotopographie actuelle du fort de Nogent-l'Abbesse. 518
Figure 6.51 : Vue planimétrique de la batterie de Frouard. 523
Figure 6.52 : Vue planimétrique du fort d'Écrouves positionné sur le revers calcaire de la côte de Meuse. 523

Figure 6.53 : Vue planimétrique des forts du Mont-Saint-Michel et de Ligniville positionnés sur des buttes-témoins calcaires jurassiques. 524
Figure 6.54 : Vue planimétrique du fort des Dunes (place de Dunkerque) positionné sur un cordon dunaire littoral. 525
Figure 6.55 : Vue 2,5D du fort Béar (Port-Vendres) positionné sur un promontoire schisteux en contexte montagneux et littoral. 526
Figure 6.56 : Vue planimétrique du fort de Montfaucon (place de Besançon) positionné en bordure de combe en contexte plissé. 527
Figure 6.57 : Vue planimétrique du fort de Châtillon-le-Duc (place de Besançon) positionné sur un éperon calcaire très étroit en contexte de bas-plateau plissé. 527
Figure 6.58 : Exemples de parement de façade de casernements de forts Séré de Rivières suggérant un répertoire lithologique diversifié à l'échelle nationale. 528
Figure 6.59 : Exemples de modernisation dans les forts du rideau de la Haute-Moselle. 531
Figure 6.60 : Les ouvrages fortifiés du système Séré de Rivières au sein du front de l'ouest. 532
Figure 6.61 : Exemples de forts de type 1874 partiellement détruits pendant la guerre de mouvement.. 533
Figure 6.62 : Exemples de forts Séré de Rivières type 1874 englobés dans les réseaux de tranchées. 534
Figure 6.63 : Indices globaux de rugosité (TRI, RgI) et distributions de pentes sur le fort de la Malmaison (place de Laon, Aisne). 535
Figure 6.64 : Bombturbation au droit du fort de Douaumont à la fin de la bataille de Verdun le 10 octobre 1916. 536
Figure 6.65 : Peinture à l'huile d'André Brauch du fort de Vaux (place de Verdun) 537
Figure 6.66 : Fort de Villey-le-Sec dont les composantes construites autour du village, où s'est développée la première association Séré de Rivières de France. 539
Figure 6.67 : Exemples de forts isolés au milieu d'espaces agro-forestiers sur une terrasse alluviale de la boucle de la Moselle (place de Toul). 540
Figure 6.68 : Croissance urbaine de l'agglomération de Lille entre le milieu du XIXe siècle et les années 2020. 541
Figure 6.69 : Fort d'Englos, à l'ouest de l'agglomération de Lille, progressivement ceint par les infrastructures routières, commerciales et industrielles. 542
Figure 6.70 : Batterie de Prémesques transformée en lotissement. 542
Figure 6.71 : Fort de Bondues partiellement arasé pour l'implantation d'un complexe sportif et de hangars fonctionnalistes. 543
Figure 6.72 : Fort de Mons-en-Barœul utilisé par la commune depuis 1984 dans le cadre de nombreuses activités socio-culturelles. 543
Figure 6.73 : Croissance urbaine de l'agglomération rémoise, mise en évidence avec les données d'occupation du sol. 544
Figure 7.1 : Exemples des principaux types de terrains artificiels de guerre adaptés de la typologie de Ford et al. (2010). 552
Figure 7.2 : Carte géomorphologique du secteur du fort de Saint-Thierry. 553
Figure 7.3 : Échelle d'effacement théorique des morphologies associées aux forts Séré de Rivières de type 1874. 555
Figure 7.4 : Morphologies du rempart du fort de Méroux (Belfort). 557

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Principales instances militaires de gouvernance au lendemain de la guerre franco-prussienne. 72
Tableau 2.2 : Synthèse des préconisations de l'instruction de 1877 relative à la plantation de la fortification. 95
Tableau 3.1 : Récapitulatif des stratégies d'alimentation en eau des forts de Reims. 138
Tableau 3.2 : Part de chaque grand type d'occupation du sol dans les sous-secteurs des inventaires LiDAR. 149
Tableau 3.3 : Informations générales relatives aux ouvrages de type 1874 de la ceinture fortifiée de Reims. 189
Tableau 4.1 : Exemples de mots-clés utilisés dans la recherche archivistique. 209
Tableau 4.2 : Extrait du tableur inventoriant toutes les photographies aériennes du SHD prises par l'armée française durant la Grande Guerre. 213
Tableau 4.3 : Évolution démographique des communes comportant au moins un ouvrage fortifié Séré de Rivières autour de Reims lors de la promulgation de la loi n° 70-1200 du 21 décembre 1970. 217
Tableau 4.4 : Liste des banques de données publiques nationales utilisées. 219
Tableau 4.5 : Liste des documents cartographiques et planimétriques employés. 228
Tableau 4.6 : Potentiel d'information des documents cartographiques employés par type d'information. 229
Tableau 4.7 : Liste des photographies de la Première Guerre mondiale du SHD géoréférencées dans le cadre de la thèse. 248
Tableau 4.8 : Liste des photographies de la Première Guerre mondiale géoréférencées provenant d'autres sources que le SHD. 249
Tableau 4.9 : Suite d'opérations mise en place pour l'exploitation des données LiDAR aéroportées. Lozić 253
Tableau 4.10 : Métadonnées et paradonnées des deux principaux relevés LiDAR aéroportés utilisés. 257
Tableau 4.11 : Paramètres standards utilisés pour le traitement et la visualisation des différents indices. 264
Tableau 4.12 : Liste des documents cartographiques utilisés sous SIG à partir d'une carte en flux. 272
Tableau 4.13 : Table attributaire utilisée pour l'inventaire cartographique. 282
Tableau 4.14 : Description des populations statistiques étudiées dans le cadre de l'analyse de l'effacement des morphologies Séré de Rivières. RgI : Indice global de rugosité (rapport surface drapée / surface plate) ; TRI : *Terrain ruggedness index*. 284
Tableau 4.15 : Critères de reconnaissance d'un relief naturel plausible pour la reconstitution topographique. 290
Tableau 4.16 : Liste simplifiée des géomatériaux classés par types d'emplois. 295
Tableau 4.17 : Extrait de l'inventaire botanique réalisé au fort de Brimont formalisé sur Excel 303
Tableau 5.1 : Statistiques générales de l'inventaire cartographique réalisé à partir des données LiDAR, par type de vecteur et par secteur. 310
Tableau 5.2 : Description morphologique de la forme globale des forts de Reims d'après l'approche géométrique. 319
Tableau 5.3 : Description morphologique de la forme globale des forts de Reims d'après une approche militaire et fonctionnelle. 320
Tableau 5.4 : Statistiques morphométriques des forts de Reims. 324
Tableau 5.5 : Description géométrique de la forme globale des forts de Reims par rapport aux statistiques morphométriques. 326
Tableau 5.6 : Statistiques relatives aux forts Séré de Rivières extraites des données LiDAR. 330

Tableau 5.7 : Estimation du volume bouleversé par la construction des forts de Reims entre 1875 et 1885. 339
Tableau 5.8 : Statistiques relatives aux terre-pleins des polémoformes de la série G2. 342
Tableau 5.9 : Statistiques relatives aux traverses de la série G2. 344
Tableau 5.10 : Statistiques relatives aux rampes de la série G2. 347
Tableau 5.11 : Statistiques relatives aux espaces de circulation interne des forts du groupe G2. 350
Tableau 5.12 : Statistiques relatives aux plongées de la série G2. 353
Tableau 5.13 : Statistiques relatives aux talus extérieurs de la série G2. 354
Tableau 5.14 : Statistiques relatives aux glacis des forts de la série G2. 355
Tableau 5.15 : Statistiques relatives aux fossés du groupe G2. 359
Tableau 5.16 : Linéaire de murs du fossé cartographié et type d'escarpe. 361
Tableau 5.17 : Statistiques relatives aux contrescarpes. 366
Tableau 5.18 : Statistiques relatives aux caponnières du groupe G2. 368
Tableau 5.19 : Statistiques relatives aux fossés diamant de la série G2. 373
Tableau 5.20 : Statistiques relatives aux bonnettes de la série G2. 374
Tableau 5.21 : Forme du massif selon la position et le type de casernement et de magasin à poudre. 382
Tableau 5.22 : Statistiques relatives aux forts de la série G1. 386
Tableau 5.23 : Statistiques relatives aux polémoformes de la Première Guerre mondiale cartographiées en polylignes. 392
Tableau 5.24 : Statistiques relatives à la conservation des tracés des tranchées et boyaux établies à partir des données LiDAR et des plans directeurs des GCTA. 396
Tableau 5.25 : Statistiques relatives aux polémoformes de la Première Guerre mondiale cartographiées avec des entités ponctuelles. 400
Tableau 5.26 : Statistiques relatives aux sites d'extraction. 423
Tableau 5.27 : Résultats de l'inventaire archivistique des sites d'extraction du Mont de Berru. 431
Tableau 5.28 : Statistiques relatives aux épaulements, aux fossés et aux levées. 441
Tableau 6.1 : Géomatériaux cohérents selon la nature géologique et les types d'emploi observés. 457

Les fortifications Séré de Rivières comme reliefs anthropiques : morphogenèse, trajectoires paysagères et implications géopatrimoniales - Approche archéogéomorphologique (LiDAR, SIG, archives) de la ceinture fortifiée de Reims (Marne, France)

Cette thèse propose une lecture géomorphologique des fortifications Séré de Rivières de la ceinture de Reims, envisagées comme des reliefs anthropiques à part entière. Elle vise à analyser la morphologie, la morphogenèse et les trajectoires paysagères de ces ouvrages construits entre 1874 et 1885, afin d'en éclairer les héritages environnementaux et géopatrimoniaux contemporains. L'approche développée repose sur l'exploitation croisée des données LiDAR aéroportées, des sources historiques et cartographiques et des observations de terrain (géomatériaux, végétation), permettant de replacer les formes visibles aujourd'hui dans une trajectoire morphogénétique polyphasée dominée par les actions humaines.

Les résultats montrent que les forts constituent des formes anthropiques résultant d'un événement géomorphologique majeur à la fin du XIXe siècle, dont les effets ont été remaniés par les modernisations militaires, les destructions de la Première Guerre mondiale et les recompositions civiles postérieures. L'analyse met en évidence une forte standardisation morphologique des ouvrages, tout en soulignant le rôle des contextes géomorphologiques locaux dans leurs modalités d'implantation et leurs trajectoires d'évolution. Les états actuels de conservation apparaissent ainsi comme le produit d'histoires d'usage différenciées, conditionnant la lisibilité morphologique des forts et leurs implications environnementales et territoriales.

En replaçant ces reliefs dans les cadres de l'anthropogéomorphologie, de l'archéogéomorphologie et des réflexions récentes sur la géodiversité, la thèse contribue à une meilleure reconnaissance des formes héritées des conflits comme composantes à part entière des socio-géo-écosystèmes contemporains. Elle propose une grille de lecture transférable à d'autres contextes fortifiés et ouvre des perspectives pour l'identification, la gestion et la valorisation de ces reliefs anthropiques dans les politiques d'aménagement et de patrimoine.

Mots-clés : Polémoformes, Anthropogéomorphologie, Archéogéomorphologie, Géodiversité, Anthropocène, Paysage de conflit

The Séré de Rivières fortifications as anthropogenic landforms: morphogenesis, landscape trajectories and geoheritage implications - An archaeogeomorphological approach (LiDAR, GIS, historical archives) to the fortified belt of Reims (Marne, France).

This thesis proposes a geomorphological reading of the Séré de Rivières fortifications of the Reims fortified belt, considered as anthropogenic landforms in their own right. It aims to analyze the morphology, morphogenesis and landscape trajectories of these structures, built between 1874 and 1885, in order to clarify their contemporary environmental and geoheritage legacies. The approach is based on the combined exploitation of airborne LiDAR data, historical and cartographic sources, and field observations (geomaterials, vegetation), enabling the forms visible today to be placed within a polyphase morphogenetic trajectory largely dominated by human actions.

The results demonstrate that the forts constitute anthropogenic landforms resulting from a major geomorphological event at the end of the nineteenth century, whose effects were subsequently reshaped by military modernizations, WW1 destructions and later civilian reconfigurations. The analysis highlights a strong degree of morphological standardization, while also emphasizing the role of local geomorphological contexts in shaping their spatial distribution and long-term evolution. Present states of preservation therefore appear as the outcome of differentiated trajectories of use and transformation, which condition both the current legibility of the forms and their environmental and territorial implications.

By situating these landforms within the frameworks of anthropogeomorphology, archaeogeomorphology and recent debates on geodiversity, this research contributes to a better recognition of conflict-related landforms as integral components of contemporary socio-geo-ecosystems. It proposes an analytical framework transferable to other fortified contexts and opens perspectives for the identification, management and valorization of anthropogenic reliefs within heritage and spatial planning policies.

Keywords: War landforms, Anthropogeomorphology, Archaeogeomorphology, Geodiversity, Anthropocene, Conflict landscape

Discipline : **GEOGRAPHIE**

Spécialité : Géographie physique

Université de Reims Champagne-Ardenne

GEGENA - UR 3795

57 rue Pierre Taittinger - 51100 REIMS