Nancy-Université
Université Henri Poincaré

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

➢ Contact SCD Nancy 1 : theses.sciences@scd.uhp-nancy.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

THÈSE
présentée à

Nancy-Université
Université Henri Poincaré

L' U.F.R. des Sciences et Techniques de l'Université Henri-Poincaré, Nancy 1
Ecole doctorale RP2E

Pour l'obtention du grade de
Docteur de l'Université Henri-Poincaré, Nancy I
Spécialité Géosciences

Les mardelles intra-forestières de Lorraine

Origines, archives paléo-environnementales, évolutions dynamiques et gestion conservatoire

Par
David ETIENNE

Thèse soutenue le 20 Mai 2011

Devant un jury composé de :

B. Hérault	Maître de Conférences, Université des Antilles-Guyane	Rapporteur
Y. Le Bissonnais	Directeur de Recherche, INRA, Montpellier	Rapporteur
F. Arnaud	Chargé de Recherche, CNRS, Université de Savoie	Examinateur
S. Dousset	Professeur, Université Henri-Poincaré, Nancy	Examinateur
D. Galop	Chargé de Recherche, CNRS, Université de Toulouse	Examinateur
S. Müller	Professeur, Univeristé Paul Verlaine, Metz	Examinateur
E. Dambrine	Professeur, Université de Savoie	Directeur
P. Ruffaldi	Maître de Conférences, Université de Franche-Comté	Co-encadrant

Ce travail de thèse a été réalisé au sein du

Laboratoire de Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers

Centre INRA de Nancy

Forêt d'Amance

54280 CHAMPENOUX

et également au sein du

Laboratoire Chrono-Environnement

UMR 6249 CNRS

Université des Sciences et Techniques de Franche-Comté

16, route de Gray

25030 BESANCON Cedex

Remerciements

Cette thèse réalisée entre Lorraine et Franche-Comté a entrainé la rencontre de nombreux scientifiques et passionnés qu'aujourd'hui je remercie pour le temps qu'ils ont accepté de me consacrer ainsi que pour leur participation, leurs conseils ou leur soutien lors de ces trois années (et quelques) de thèse.

En premier lieu, je tiens vivement à remercier mes deux co-encadrants de thèse, Etienne Dambrine et Pascale Ruffaldi de m'avoir proposé un sujet aussi passionnant. Merci d'avoir toujours été présents pour répondre à toutes mes sollicitations aussi bien pour des questions scientifiques qu'administratives. Merci de l'entousiasme constant que vous avez eu pour mon travail ainsi que l'énergie et la passion que vous m'avez transmis pendant ces trois années.

Merci à toi Etienne pour les journées pataugeages dans les mardelles auxquelles tu as participé avec plaisir j'en suis sûr. Je pense également aux nombreuses heures à discuter sur les mardelles. Je te remercie également de m'avoir si bien accueilli chez toi lors de mes nombreux passages à Nancy.

Merci également à toi Pascale, pour tous les moments passés à parler ensemble des mardelles autour d'une tasse de thé. J'ai également particulièrement apprécié le temps que tu m'as consacré dès mon arrivée sur Besançon pour m'apprendre la palyno.

Je remercie sincèrement les membres du Jury Bruno Hérault, Yves Le Bissonais, Serge Müller, Didier Galop, Fabien Arnaud et Sylvie Dousset, qui ont accepté de rapporter et d'examiner ce manuscrit.

Je tiens à remercier Freddy Ritz qui depuis plus de 10 ans se bat pour protéger les mardelles du Plateau lorrain. J'espère que ce travail de thèse aura répondu à ces espérances et à ces questions, du moins en partie j'espère. Je tiens également à le remercier pour les journées passées à se promener dans les forêts lorraines.

Je pense également à Murielle Georges-Leroy qui a accepté de m'apprendre les rudiments du SIG et qui a montré un interêt constant pour ma recherche. Je la remercie également du temps quelle a consacré à la relecture de ce manuscrit mais également des articles.

Je remercie également Jean-Luc Dupouey pour son aide lors des traitements statistiques des données polliniques grâce à sa grande expérience de SAS. Merci également pour toutes ses

questions, toujours pertinentes et précises et qui m'ont poussées à chaque fois à réfléchir un peu, à parler un peu moins, et à essayer de revenir la fois d'après avec au moins une partie de la réponse.

Je tiens particulièrement à remercier tous les membres de l'INRAP de Metz qui nous ont offert des conditions optimales de travail à leur coté, lors de journées de prospections archéologiques sur les fouilles préventives de la LGV Est. Merci tout d'abord à Laurent Gebus qui nous a autorisé à suivre et à participer à ces fouilles préventives. Un grand merci à Sébastien Viller, Michel Gazenbeek et Thierry Klag d'avoir toujours facilités notre présence sur les sites de fouilles et d'avoir partagé avec nous leurs découvertes et leurs données qui viennent largement enrichir ce manuscrit de thèse. Je pense également à Stéphanie Goepp pour l'ensemble du travaille qu'elle a réalisé lors des fouilles de mardelles. Merci également à Pilar, Jimmy et à toutes les personnes que j'ai rencontré lors de ces travaux de fouilles.

Je remercie également Hervé Richard pour avoir accepté et facilité ma venue au sein du Laboratoire Chrono-environnement en m'offrant les conditions matérielles optimales à la bonne réalisation de cette thèse. Au cours de ces trois années, j'ai eu la chance de rencontrer beaucoup de personnes au sein de ce laboratoire.

Je me dois évidemment de commencer par remercier mes deux compères de bureau que sont Damien Rius et Laurent Millet. Merci pour l'ambiance studieuse (ou moins) qu'ils ont su imprimer pendant les deux années durant lesquelles j'ai partagé leur bureau, ainsi que pour les nombreux débats scientifiques (ou moins) qui ont jalonné ces années.

Un grand merci à toute l'équipe des géophysiciens qui ont présenté un intérêt pour l'étude des mardelles et ont tant apprécié, à leur grand étonnement, le climat lorrain et le magnifique village de Tarquimpol. Merci donc à Christian Camerlynck, Gilles Bossuet, Clément Laplaige et bien sûr à Jean-Pierre Simonnet, le GPS-humain.

Je pense donc à tous les membres du Laboratoire Chrono-Environnement qui ont entendu ma grosse voix à travers les couloirs du labo durant ces trois années. Une pensée pour l'équipe des informaticiens, Jean-Daniel (JD) Tissot et Charles-Henri Falconnet, toujours disponibles lors de sollicitations techniques ou pour des discussions moins constructives. Merci à Sébastien, Carole, Isabelle, Olivier, Arnaud, Matthieu, Emilie et Julien pour les moments passés autour d'une tasse à café à discuter de tout, de rien et de la thèse évidemment.

Je pense également à Claire Pagnier et Emeline Lequy qui ont travaillé sur les mardelles lors de leurs stages de Master 1 et qui ont partagé avec moi plusieurs journées à la recherche des mardelles.

Je remercie également Boris Vannière et Isabelle Mouret de m'avoir proposé de participer à l'organisation du workshop QUESTING.

Mais cette thèse s'est également déroulée en partie à Nancy et je n'oublie pas les membres du BEF de l'INRA qui m'ont bien souvent vu passer en coup de vent, de retour ou en départ vers des « journées mardelles ». Je regrette de ne pas avoir pu partager avec vous plus de temps mais merci de votre gentillesse et votre bonne humeur lors de mes courts séjours. Merci donc à Christelle, Bruno, Emeline, Pierre-Joseph, Berndt, Gilles et tous les autres. Je remercie tout spécialement Benoît (Ben) Pollier, entre autre, pour son assistance lors des prélévements palyno. Je pense également à Isabelle Martin qui a géré plusieurs fois l'assistance ou l'urgence administrative.

Je remercie également Yves Lefevre qui a parcouru avec moi la forêt du Römersberg et m'a aidé à mieux en comprendre la pédologie. Et par la suite, merci d'avoir mis à ma disposition des cartes pédologiques ou des échantillons de sols qui se sont avérés très utiles.

Merci à Catty Zeller qui m'avait initié au dur monde des archives avant ma thèse et qui a fourni un important travail de recherche sur les mardelles que j'ai pu utiliser dans ce manuscrit et qui sera encore valorisé par la suite je l'espère.

Merci également à l'ensemble des organismes qui ont participé au financement de cette thèse. Ma reconnaissance s'adresse à Jérome Bock de l'Office National de Forêts, merci à la Zone Atelier Moselle et plus particulièrement à Emmanuelle Montarges. Je remercie vivement Marie L'hospitalier pour avoir initié le programme « Mares tourbeuses » au sein du Parc Naturel Régional Lorrain mais également Laurent Godé et Jerome Dao.

Un clin d'oeil également à tous mes amis de Nancy, spécialement à Nicolas qui a subi de plein fouet mon travail de thèse en étant sollicité à l'occasion pour des journées à la recherche des mardelles et si fréquemment pour m'héberger lors de mes venues sur Nancy. Je n'oublie évidemment pas Aurélien, Vincent et Valérie qui m'ont accompagné depuis mes premières années de faculté. Je pense également aux bisontines Maud et Valérie qui ont subi, mais seulement en partie par ma faute, des discussions de doctorants qui n'ont certainement pas du toujours les passionnées.

Une pensée également pour Naïma Dambrine pour son accueil lors de mes venues à Brin-

sur-Seille et une pensée pour les trois bouts de chou Aroun, Lucas et Roman que j'aurais vu avec plaisir grandir (ou arriver) durant ces trois années.

Je remercie mes parents d'avoir compris les raisons qui m'ont poussé à réaliser cette thèse et la curiosité dont ils ont fait preuve pour comprendre mon sujet. Je remercie particlièrement ma mère pour la relecture rapide et efficace de ce manuscrit, et mon père d'être venu avec moi patauger dans les mardelles. Merci également à mon frère de m'avoir offert le gîte lors de mes passages à Metz et de ses conseils avisés d'ancien doctorant.

Et bien sûr félicitation à toi Elise de m'avoir supporté pendant ces trois années et surtout merci de m'avoir toujours soutenu et boosté dans mon travail.

Sommaire

Chapitre 1 : *Sites d'études, contexte environnemental et humain* *33*

1. Conditions environnementales **35**

1.1 Contexte géographique, géologique et pédologique 35

1.2 Climat, paysages et végétation 36

2. Sites d'études **38**

3. Contexte historique et archéologique **38**

3.1 Le second Age du Fer (La Tène, 450 à 52 av. J.-C. / 2400-2002 cal. BP) 38

3.2 La période gallo-romaine 40

3.2.1 Le Haut-Empire (52 av. J.-C. à 235 ap. J.-C. / 2002-1715 cal. BP) *40*

3.2.2 L'Antiquité tardive (235 à 476 ap. J.-C. / 1715-1474 cal. BP) *42*

3.3 Le Moyen Age 42

3.3.1 Le Haut Moyen Age (Ve au XIe siècles ap. J.-C.) *43*

3.3.2 Le Moyen Age classique (XIe au XVe siècles ap. J.-C.) *43*

3.4 La période Moderne et Contemporaine (XVe siècle ap. J.-C. à aujourd'hui) 43

Chapitre 2 : *Matériels & Méthodes* *47*

1. Palynologie **49**

1.1 Prélèvement et échantillonnage 49

1.2 Préparation chimique et analyses polliniques 49

1.3 Représentation des diagrammes polliniques 49

2. Les Microfossiles Non Polliniques (MNPs) **50**

3. Les datations 52
3.1 Datations radiocarbone AMS 52
3.2 Modèles âge-profondeur 52

4. Analyse des données polliniques 53
4.1 Principe 53
4.2 Méthodologie 54

5. Sédimentologie 54

6. LiDAR (Light Detection and Ranging) 55
6.1 Principe 55
6.2 Le vol LiDAR LGV 56
6.3 Le vol LiDAR IGN 57

7. Études morphologiques 59
7.1 Relevés manuels 59
7.2 Campagnes de fouilles 59
7.3 Prospections géophysiques 59
7.3.1 Prospection radar sol 61
7.3.2 Prospection électrique 62

Chapitre 3 : *Origine des dépressions fermées du Plateau lorrain, les mardelles 65*

1. Introduction 67

2. Résultats et interprétations 68
2.1 Contexte géologique 68
2.2 Morphologies 71
2.2.1 Sondages manuels 71
2.2.2 Fouilles « archéologiques » 71
2.2.3 Prospections géophysiques 73
2.2.3.1. Prospection électrique 73
2.2.3.2. Prospection radar sol 75

2.3 Sédimentation 75
2.4 La datation des fonds sédimentaires 81
2.5 Etudes polliniques et des Microfossiles Non Polliniques (MNPs) 82

3. Discussion et conclusions 86
3.1 Les mardelles : formation naturelle, anthropique ou remodelage ? 86
3.2 But du creusement ? 87

Chapitre 4 : *Inventaire, distribution et génèse des dépressions fermées du Plateau lorrain - Apport de la prospection LiDAR -..... 91*

1. Introduction 93

2. Méthodologie 93
2.1 Les prospections LiDAR utilisées en Lorraine 93
2.1.1 Etalonnage des données 94
2.2 Le LiDAR en Franche-Comté 99

3. Résultats et interprétations 100
3.1 Contexte général 100
3.2 Contexte paysager 100
3.3 Influence du contexte paysager 101
3.4 Localisation topographique 102
3.5 Distance entre les structures 102
3.6 Les différents contextes géologiques en Lorraine 104
3.6.1 Influence du contexte géologique sur les superficies 105
3.6.2 Influence du contexte géologique sur les distances inter-mardelles 105
3.7 Contexte archéologique 107
3.7.1 Parcellaires agraires 107

4. Discussions 108
4.1 Définition physique de l'objet « mardelle » 108
4.2 Les dépressions fermées sur les autres contextes géologiques, des mardelles ? 111
4.3 Relation au contexte archéologique 112
4.3.1 Datation du parcellaire 112
4.3.2 Disposition au sein du parcellaire 113

Chapitre 5 : ***Histoire des forêts anciennes du Plateau lorrain...115***

1. Introduction 117

2. Résultats et interprétations 118

2.1 Analyse en Composante Principale (ACP) 118

2.2 Pluie pollinique actuelle 120

2.2.1 Le rapport AP/T 122

2.2.2 Indices polliniques d'anthropisation, céréales et ACP 122

2.2.3 Image pollinique du peuplement forestier actuel 122

2.3 Pluie pollinique fossile 125

2.3.1 Contrôle chronologique 125

2.3.2 Description de l'anthropisation depuis 2000 ans grâce aux mardelles 128

2.3.2.1 Second Age du Fer (La Tène): 2150/2000 cal. BP 128

2.3.2.2 Période Romaine : 2000/1500 cal. BP 129

2.3.2.3 Haut Moyen Age (Mérovingien/Carolingien) : 1500/1050 cal. BP 129

2.3.2.4 Moyen Age classique : 1050/550 cal. BP 136

2.3.2.5 Moyen Age classique / Période Moderne : 550/150 cal. BP 137

2.3.2.6 Période Moderne à Aujourd'hui: 150/-50 cal. BP 138

2.3.3 Analyse de la séquence du bas-marais de Francaltroff (FRA) 138

3. Discussions 142

3.1 D'un paysage pastoral antique à l'agriculture médiévale, du terroir à la révolution agricole ? 142

3.2 Anthropisation et création des mardelles 143

Chapitre 6 : ***Influences des pratiques agraires antiques et médievales sur les flux d'érosion et la distribution des sols 147***

1. Introduction 149

2. Résultats et interprétations 150

2.1 Origine des limons de plateau 150

2.2 Relations topographie, épaisseur des limons et localisation des mardelles 151

2.2.1 Epaisseurs des limons, orientations des versants et topographie 151

2.2.2 Localisation des mardelles selon la topographie 151
2.2.3 Localisation des mardelles selon le contexte pédologique 155
2.3 Erosion des limons de plateau 157
2.3.1 Mardelle de Sarrebourg (SAR) 159
2.3.2 Mardelle d'Assenoncourt (ASS) 164
2.3.3 Mardelle de Bisping (BIS) 164
2.4 Fouilles archéologiques 165
2.5 Granulométrie et phosphore 165

3. Interprétations et discussion 170
3.1 Dépôts de limons et carte pédologique actuelle 170
3.2 Erosions et influences des pratiques anciennes sur la pédologie actuelle 170

Chapitre 7 : *Flore des mardelles intra-forestières : originalité, typologie et évolution 173*

1. Introduction 175

2. Résultats et Interprétations 176
2.1 La flore des mares forestières comparée aux prairies, forêts et étangs 176
2.2 Typologie actuelle des mares intra-forestières 176
2.2.1 Mardelles sans végétation ou à faible végétation (T1) 179
2.2.2 Mares à végétation unique herbacée (T2) 181
2.2.3 Mares à saule (T3) 181
2.2.4 Aulnaies marécageuses (T4) / à sphaignes (T5) 183
2.2.5 Boulaie acide à sphaignes (T6) 184

2.3 Relation entre la superficie et la typologie des mares intra-forestières 186
2.4 Dynamique temporelle de végétation 187
2.4.1 Analyses polliniques des mares tourbeuses et comblée (Bisping) 187
2.4.1.1 Les étangs à hygrophiles et les saulaies 187
2.4.1.2 Les aulnaies marécageuses (T4), à sphaignes (T5) 188
2.4.1.3 Les boulaies à sphaignes (T6) 195
2.4.2 Analyses polliniques des mares intra-forestières sans végétation (T1) ... 195
2.4.3 Relation entre mode de sédimentation et type de végétation 195
2.4.4 Analyse en Composante Principale (ACP) 197

3. Discussion et conclusions.....197
3.1 Dynamique végétale des mardelles forestières.....197
3.2 Apport actuel des mares forestières à la biodiversité en Lorraine.....201
3.3 Gestion et conservation de la biodiversité des mardelles intra-forestières.....202

Conclusions..... 207

Perspectives 213

Annexes 217

Bibliographie 237

Liste des Annexes

Annexe 1 : Représentation schématique d'une cabane gauloise construite dans une mardelle. Extrait de Linckenheld (1927).

Annexe 2 : Article intitulé *Le mystère du trou de Langatte,* paru dans le journal du Républicain lorrain daté du 25 Mars 2010.

Annexe 3 : Carte de l'inventaire de Wichmann des mardelles du Plateau lorrain en 1903. Extrait de Delafosse (1948).

Annexe 4 : Montage photographique de la fouille de la mardelle de Bisping (Sources S. Goepp et S. Viller, INRAP Metz).

Annexe 5 : Représentation schématique de la coupe de la mardelle de Bisping (Sources S. Goepp et S. Viller, INRAP Metz).

Annexe 6 : Montage photographique de la fouille de la mardelle de Langatte (Sources S. Goepp et S. Viller, INRAP Metz).

Annexe 7 : Représentation schématique de la coupe de la mardelle de Langatte (Sources S. Goepp et S. Viller, INRAP Metz).

Annexe 8 : Montage photographique de la fouille de la mardelle de Haut-Clocher (Sources S. Goepp et S. Viller, INRAP Metz).

Annexe 9 : Représentation schématique de la coupe de la mardelle de Haut-Clocher (Sources S. Goepp et S. Viller, INRAP Metz).

Annexe 10 : Photographies des fouilles de la mardelle H2 (Sources T. & P. Klag, INRAP Metz).

Annexe 11 : Représentation schématique des coupes de la mardelle de Cutting (Source M. Gazenbeek, INRAP Metz).

Annexe 12 : Photographie d'un effondrement en contexte forestier sur les terrains du Keuper supérieur. Extrait de Delafosse (1948).

Annexe 13 : Photographie d'un effondrement en contexte forestier sur les terrains du Keuper supérieur.

Annexe 14 : Plan de l'ensemble des structures archéologiques découvertes sur le site de Cutting (Source M. Gazenbeek, INRAP Metz).

Liste des Annexes (Suite)

Annexe 15 : Carte partielle de 1712 des bois bordant le Lindre et réservés aux salines de Dieuze (Source C. Zeller).

Annexe 16 : Carte (non datée) des coupes forestières réglées des bois de l'abbaye de Vergaville (Moselle). Source Catherine Zeller.

Annexe 17 : Photographie d'une mardelle localisée en forêt du Römersberg (Moselle) et une en forêt de Flatten (Moselle) extraite de Delafosse (1948).

Annexe 18 : Tableau regroupant les auteurs, le nombre de relevés et les différents paramètres utilisées pour les 663 relevés floristiques de mardelles de la base de données de Lequy (2009).

Annexe 19 : Plan du ban de Langatte daté de 1732 et indiquant la présence de nombreuses mardelles en champs. Source Catherine Zeller.



« *Vous savez ce qu'est une mardelle : vous avez vu ces grands trous béants au milieu de nos champs aujourd'hui cultivés, jadis couverts d'étangs et de forêts. Plusieurs ont de l'eau au fond tandis qu'à un niveau plus élevé, on a trouvé des cendres, des os, des débris de poteries et des pierres disposées en foyer.*

On peut croire que les peuples primitifs aimaient à demeurer sur l'eau [...]. Moi, j'imagine que, dans les pays de plaine comme les nôtres, où l'eau est rare, on creusait le plus profondément possible, et, autant que possible, aussi dans le voisinage d'une source.

[...]on bâtissait sur pilotis une spacieuse demeure, qui s'élevait comme un îlot dans un entonnoir et dont les toits inaperçus ne s'élevaient pas au-dessus du niveau du sol, toutes conditions de sécurité contre le parcours des bêtes sauvages ou l'invasion des hordes ennemies.

Quoi qu'il en soit, l'homme [...] résidait dans une grande mardelle (on dit aussi margelle), entourée de beaucoup d'autres plus petites et moins profondes, où plusieurs familles s'étaient établies pour obéir à ses ordres en bénéficiant de sa protection. »

Georges Sand, *Le Marteau Rouge*

dans *Contes d'une grand-mère*, *Le Temps*, 28 Juillet 1875

Document de couverture de l’introduction

Photographie de la mardelle de Saint Jean dans la région de Dieuze (Moselle, France). Cliché de Frédéric Ritz.

La réalité d'un réchauffement climatique fait désormais l'objet d'un consensus au sein de la communauté scientifique (GIEC, 2007 ; Puget *et al.*, 2010). Plusieurs programmes de suivi *in situ* des écosystèmes terrestres fournissent depuis plusieurs années des informations sur l'effet de ces changements globaux sur la biodiversité actuelle. Le suivi actuel des écosystèmes forestiers s'intégre dans le cadre de programmes tels que le réseau RENECOFOR (Réseau National de suivi à long terme des ECOsystèmes FORestiers). Leur but étant de renseigner les changements des écosystèmes forestiers et de mieux en comprendre les raisons (pollution atmosphérique, changement climatique).

Toutefois, ces suivis pluri-annuels n'offrent une vision qu'à une échelle décennale et ne prennent pas ou peu en compte, la continuité de l'histoire de ces écosytèmes et les différents usages anthropiques les ayant impactés au cours des derniers millénaires. Les écologistes et les organisations environnementales reconnaissent désormais l'héritage des activités agraires passées sur la structuration et la biodiversité actuelle des écosystèmes (Foster *et al.*, 2003). Les études paléoenvironnementales ont ainsi un rôle prépondérant dans la volonté des pouvoirs publics de définir une « naturalité » des différentes composantes des écosystèmes (Willis & Birks, 2006) et nécessaire dans l'optique d'une future restauration (Swetnam *et al.*, 1999 ; Harris *et al.*, 2006 ; Jackson & Hobbs, 2009).

Les lacunes géographiques des reconstitutions paléoenvironnementales et la difficulté de prospection archéologique hors des systèmes agricoles et prairiaux, engendrent l'idée qu'une partie des écosystèmes forestiers actuels n'auraient subi qu'une anthropisation négligeable au cours des temps historiques. Ce postulat n'est évidemment pas valable pour toutes les forêts actuelles. En effet; les statistiques forestières indiquent, qu'en France, la superficie des forêts a quasiment doublé de surface depuis 1850, s'installant sur d'anciennes zones agricoles abandonnées (Rousseau, 1990 ; Cinotti, 1996 ; Koerner *et al.*, 2000).

Les données cartographiques anciennes (cartes des Naudins, de Cassini et d'Etat Major) fournissent des informations spatialisées précises sur l'ancienneté de ces forêts (Dupouey *et al.*, 2007). Ainsi, des recherches en écologie forestière démontrent la pérennité des pratiques agricoles sur la fertilité des sols forestiers, la productivité des peuplements et la biodiversité forestière actuelle (Hermy *et al.*, 1999 ; Bellemare *et al.*, 2002 ; Dupouey *et al.*, 2002a ; Jussy *et al.*, 2002). Ces différences de fertilité des sols et de biodiversité floristique ont conduit à distinguer dans les paysages actuels, les forêts pré-existantes au minimum forestier de 1830 et décrites en tant que forêt dans les plus anciens documents disponibles, et à les désigner par le terme de forêts « anciennes ». Celles-ci présenteraient actuellement un état d'équilibre avec les conditions pédologiques et climatiques locales.

Toutefois, le développement des prospections archéologiques et l'utilisation de prospection

LiDAR aéroporté (**LI**ght **D**etection **A**nd **R**anging) au sein de ces forêts « anciennes », démontrent que certaines d'entre-elles ont également été défrichées et cultivées au cours des périodes médiévales ou antiques (Crutchley, 2009 ; Georges-Leroy *et al.*, 2009). De plus, des travaux en pédologie et en écologie forestière démontrent que les propriétés géochimiques (enrichissement en phosphore et en azote) de ces sols pourtant forestiers depuis plusieurs centaines d'années, ainsi que leur biodiversité végétale, sont toujours affectés par des pratiques agraires pouvant dater de deux millénaires (Koerner *et al.*, 1997 ; Dambrine *et al.*, 2007).

L'utilisation des documents historiques (cartes anciennes, plans terriers, archives abbatiales) et des données archéologiques n'offrent qu'une vision discontinue et partielle de l'histoire de ces forêts « anciennes ». Dès lors, la recherche d'archives sédimentaires et l'utilisation des techniques paléoenvironnementales sont indispensables (Briggs *et al.*, 2006). Elles offrent une vision temporelle continue des changements d'usages de ces sols actuellement forestiers, au cours des grandes périodes historiques d'anthropisation des paysages, et de leurs impacts sur la biodiversité.

L'étude des changements locaux d'usages des sols, de la biodiversité et de l'implantation des zones forestières nécessite l'utilisation de nombreux capteurs sédimentaires de faible diamètres afin de limiter la zone de captation sédimentaire et pollinique (Chen, 1988) de chaque capteur et néanmoins d'étudier des situations diverses. La capacité des structures à faible bassin versant à retranscrire les évolutions du couvert végétal à une échelle très locale, est démontrée par des études théoriques (Sugita, 1994) et empiriques (Jackson, 1990 ; Calcotte, 1995, 1998) alors que l'apport pollinique régional s'additionne à l'image pollinique locale pour les systèmes lacustres possédant un grand bassin versant (Tauber, 1965 ; Andersen, 1970 ; Prentice, 1985 ; Parshall & Calcote, 1995). Il est alors indispensable d'étudier les archives sédimentaires de plusieurs de ces structures à faible bassin versant, afin de distinguer la spécificité locale de la dynamique régionale.

On trouve de nombreuses petites dépressions humides dans les « anciennes » forêts du Plateau lorrain dans le nord-est de la France (Moselle) et appelées localement « mardelles ». La définition exacte de ce terme correspond dans le dictionnaire de la commission française des phénomènes karstiques (1972) à « *une doline enrobée de dépôts superficiels argileux imperméables* ». On retrouve une définition très proche, « *petite dépression plus ou moins conique qu'on trouve en Berry et sur certains plateaux calcaires du nord de la France* », dans le dictionnaire de géologie de Foucault & Raoult (2005). D'autres termes sont utilisés dans la littérature pour les nommer, on trouve pêle-mêle margelle, mare au diable, mare des païens (*Heidenpullen*), maires ou mores. L'origine de ce mot « mardelle »est difficile à retracer toutefois Wichmann (1903) pense qu'il s'agirait d'un mot provenant du patois, Guillard (1873, dans Grenier 1906) retrace une étymologie

d'origine allemande provenant du mot *mertel* (marne en allemand). La marne que l'on retrouve également d'après *Pline l'Ancien* (livre 17, chapitre XVI) dans la langue gauloise et bretonne sous le terme de le mot *marga* ou *margilla*.

Le terme « mardelle » est utilisé dans de nombreuses publications françaises que ce soit dans le Bassigny (Dangien & Decornet, 1977), le Berry (Desforges, 1908), la Nièvre (Braque, 1966), la région parisienne (Cailleux, 1956 ; Pissart, 1958), en Sologne (Courbouleix & Fleury, 1996) ou en Touraine (Couderc, 1979). Il correspond dans la littérature anglaise à celui de *Closed Depression* (CD), *forest hollow* ou *pond* généralement défini comme de « petits milieux humides isolés, dont l'apport hydrique est météorique et dont la sédimentation est entourée par des versants » (Norton, 1986 ; Tiner, 2003). Ces termes mares, dolines ou mardelles en français et CD ou pond en anglais, sont en fait utilisés pour des phénomènes possédant une concordance morphologique de surface mais dont les origines sont potentiellement très différentes en fonction des conditions (paléo-) climatiques, des substrats géologiques et de la localisation géographique.

Depuis une vingtaine d'années, ces mares intra-forestières ont recu l'intérêt croissant des écologistes en France et dans les régions limitrophes de la Belgique et du Luxembourg (Thoen, 1997 ; Millarakis, 2001 ; Thoen & Hérault, 2006 ; Hérault & Thoen, 2008 ; Hérault & Thoen, 2009). Ces dépressions humides sont identifiées comme des ilots majeurs de biodiversité floristique et faunistique dans les paysages actuels. Elles représentent des « îles » d'aquatiques dans un océan de forêts drainées. En Lorraine, ces dépressions sont actuellement intégrées dans des politiques d'étude et de conservation des milieux humides (*Natura 2000*, Parc Naturel Régional, ZNIEFF, …) afin de les protéger. L'étude de leur formation, de leur fonctionnement hydrique et de leur dynamique de colonisation végétale se révèle donc indispensable avant la mise en place de directives de gestion, de conservation ou de restauration de leur biodiversité.

Dans ce manuscrit, nous nous attacherons à réaliser une étude intégrée des « mardelles » dans le nord-est de la France et plus particulièrement en région Lorraine, dans le département de la Moselle. Après une présentation du cadre environnemental et historique de cette étude (***Chapitre I***), nous présenterons les différentes méthodes utilisées, couvrant plusieurs champs thématiques tels que le paléoenvironnement (palynologie, Microfossiles Non Polliniques), l'analyse spatiale du paysage (SIG), l'archéologie, la géomorphologie ainsi que la prospection géophysique (***Chapitre II***).

Au cours du ***Chapitre III***, nous rassemblerons les nombreuses données bibliographiques sur la question de l'origine des mardelles, sujet opposant depuis près de 150 ans les partisans d'une formation naturelle ou anthropique. Nous apporterons de nouvelles données issues de

fouilles archéologiques de plusieurs d'entre-elles, afin d'en préciser leurs caractéristiques géomorphologiques et sédimentaires. Des datations radiocarbone (C^{14} AMS) et des études polliniques de leurs fonds sédimentaires permettront de définir la période chrono-culturelle et le contexte paysager de leur formation.

Dans le ***Chapitre IV***, nous utiliserons la méthode de prospection LiDAR (Light Detection And Ranging) pour caractériser les paramètres métriques, l'implantation topographique et paysagère des mardelles en Lorraine. Nous placerons également en perspective ces inventaires avec les caractéristiques géologiques et pédologiques de notre zone d'étude ainsi que les vestiges archéologiques connus.

Au cours du ***Chapitre V***, l'utilisation de méthodes paléoenvironnementales appliquées à ces enregistrements sédimentaires, nous permettra de reconstituer l'évolution des changements d'usages des sols, des pratiques agraires et des peuplements forestiers au cours des deux derniers millénaires. Ceci grâce à des analyses polliniques et également à travers l'utilisation d'outils statistiques. Nous utiliserons en particulier l'Analyse en Composante Principale (ACP) pour calculer des indices de mise en valeur agricole et pastorale des paysages.

Ces changements de couvertures végétales (forêt, champs, prairies) et d'usages agraires des sols ont pu provoquer des phases érosives affectant les horizons pédologiques de surface (limons acides). L'utilisation des mardelles en tant que capteurs de ces flux sédimentaires, nous permettra de discuter de l'impact des pratiques antiques ou médiévales révélées par les études paléoenvironnementales sur les sols actuels et d'en quantifier les pertes de sol (***Chapitre VI***).

Dans le ***Chapitre VII***, nous identifierons l'intérêt floristique spécifique de ces milieux humides en comparaison des autres écosystèmes existants (forêts, prairies, lacs) afin d'en discriminer leur végétation caractéristique. Nous tenterons également d'identifier à quels groupes phytosociologiques leurs colonisations végétales actuelles peuvent être rattachées et de les relier à des caractéristiques métriques et topographique de ces mardelles. Grâce à l'étude des enregistrements polliniques, nous proposerons un schéma évolutif de la dynamique végétale de ces structures depuis leur formation ainsi nous suggérons des conseils de gestion de ces milieux humides dans l'optique d'en protéger la biodiversité.

Chapitre 1

Sites d'études, contexte environnemental et humain



Document de couverture du chapitre

Photographie du site de fouille de la villa de Saint-Ulrich à Dolving (Moselle). Cliché du Conseil Général de la Moselle.

1. Conditions environnementales

1.1 Contexte géographique, géologique et pédologique

Notre zone d'étude est localisée dans le nord-est de la France (Fig. 1.1a) dans la partie orientale du Bassin parisien, en région Lorraine et plus particulièrement dans le département de la Moselle (Fig. 1.1b). Cette partie du Bassin parisien, correspondant au Plateau lorrain, est formé par une zone de plaine de basse altitude délimitée dans sa partie orientale par le massif gréseux des Vosges et dans sa partie occidentale par le massif des Ardennes et entrecoupé par les lignes de côtes de Moselle, de Meuse et de l'Argonne. Le Plateau lorrain est formé d'une succession de petites collines et de vallées ondulées orientées NE/SO et oscillant entre 150 et 300 m d'altitude.

Le socle géologique de la région est composé d'est en ouest par les grès vosgiens du Buntsandstein, le calcaire coquillier du Muschelkalk, les marnes du Keuper inférieur et supérieur au sein desquelles on retrouve des massifs isolés de grès du Rhétien inférieur (grès à roseaux), le calcaire de l'Héttangien-Sinémurien, le calcaire du Bajocien formant les côtes de Moselle et le calcaire du Callovien formant les côtes de Meuse (Fig. 1.1c).

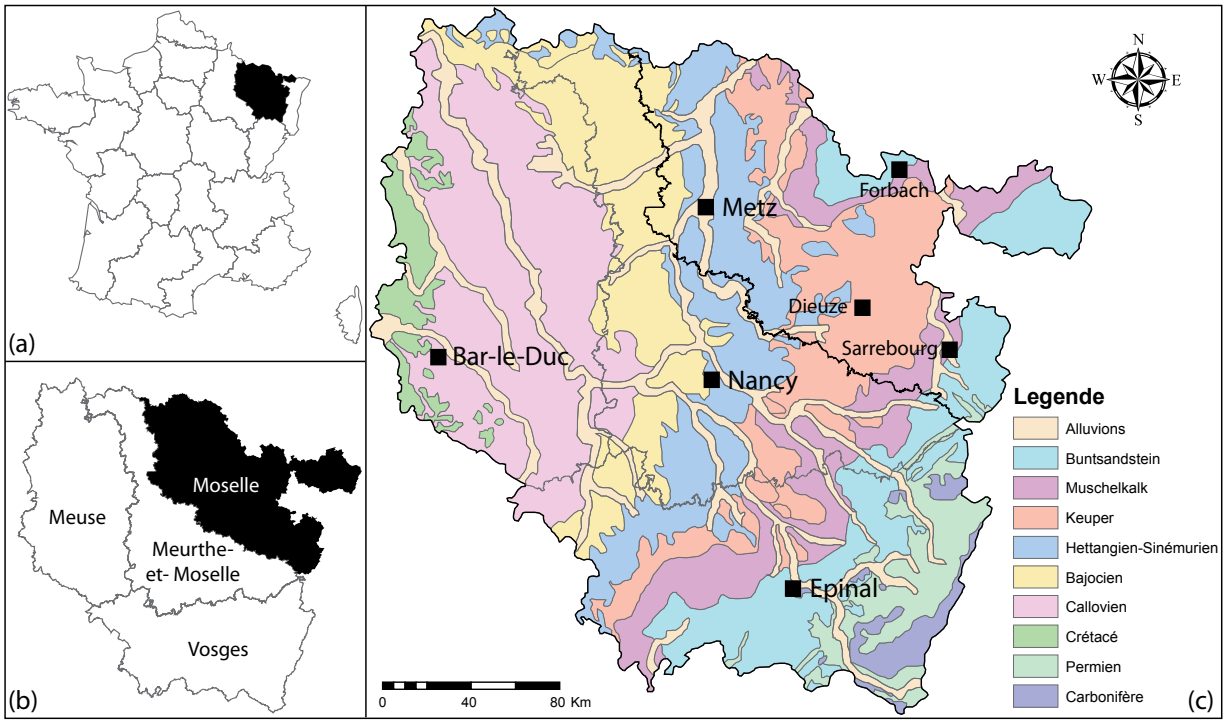


Figure 1.1 - Localisation géographique de la zone d'étude (a) dans le nord-est de la France en région Lorraine et plus particulièrement (b) dans le département de la Moselle. La carte géologique de la Lorraine (c) se base sur les données du BRGM (2001).

La grande majorité de nos sites sont localisés sur les terrains du Keuper inférieur constitués par des marnes aux teintes variées (grise, verte, rouge ou violette). Un forage à 10 km au sud-ouest de Dieuze (Languimberg) et traversant 135 m de Keuper inférieur, a montré des intercalations de sel gemme, de gypse et d'anhydrite à 50 et 75 m de profondeur. Des forages plus anciens

n'ont pas révélé de couches de sel gemme exploitables. Les marnes du Keuper supérieur, de couleurs claires et de teintes vertes, grises ou violettes, présentent de fréquentes intercalations de marnes dolomitiques compactes grises et blanches ou de bancs de tailles centimètriques (BRGM, 2001).

Les marnes du Keuper inférieur sont recouvertes d'un dépôt de limons de plateau d'une épaisseur de 0 à 2 m suivant les secteurs (Guckert *et al.*, 1970) influençant directement la pédologie actuelle. L'origine de ces limons et la question de l'homogénéité de leur dépôt seront développées dans ce manuscrit (*cf. Chapitre 6*). Les types de sols sont différenciés selon la profondeur d'apparition des argiles lourdes résultant de la décarbonatation du matériau marneux en place. Suivant les épaisseurs de limons, on retrouve principalement des Pélosol Typique (marne affleurante), des Pélosol Différencié (épaisseur des limons de 25-30 cm), des Néoluvisol-Rédoxique (50-80 cm) et des Luvisol Rédoxique (> 1 m).

1.2 Climat, paysages et végétation

Le climat du Plateau lorrain est de type semi-continental avec des précipitations moyennes annuelles de 760 mm et une température moyenne annuelle de 9,5 °C. Les saisons sont contrastées avec une température moyenne en Janvier de 1,2 °C et de 18,3 °C en Juillet.

Les paysages sont formés de grandes forêts, aujourd'hui gérées par l'Office National des Forêts (ONF), de nombreuses surfaces agricoles et de quelques pâturages (Fig. 1.2). La topographie du Plateau lorrain étant peu marquée et les variations altitudinales négligeables, les éléments fondamentaux caractéristiques des stations forestières sont les roches mères et les conditions pédologiques et en particulier la dynamique de l'eau dans les sols. Les groupes écologiques sont identifiés dans le catalogue des stations forestières du Plateau lorrain (Brethes, 1976).

Ainsi les stations aux argiles affleurantes possèdent des caractéristiques particulières avec des sols lourds, très argileux, gorgés d'eau en période humide et très secs en période estivale. Ces conditions conviennent au hêtre commun (*Fagus sylvatica*) dans les zones les mieux drainées et au chêne pédonculé (*Quercus robur*) ainsi qu'au tilleul à petites feuilles (*Tilia cordata*). La végétation herbacée est caractérisée par la présence de plantes mésohygrophiles des sols lourds (*Deschampsia cespitosa*, *Carex umbrosa*), calcaricoles et nitrophiles (*Geum urbanum*).

Les faibles épaisseurs de limons (< 30 cm) autorisent le développement d'une faible acidification et entraînent la formation de nappe temporaire en période humide et de conditions asphyxiques. Le chêne pédonculé accompagné par le charme (*Carpinus betulus*) en sous-étage sont les essences les mieux adaptées à ces conditions. La végétation herbacée est caractérisée par la présence de plantes mésoneutrophiles (*Carex sylvatica*, *Galium sylvaticum*, *Lamium galeobdolon*).

Pour les stations à limons moyennement épais (30 à 50 cm) sur marne décarbonatée, la mise en

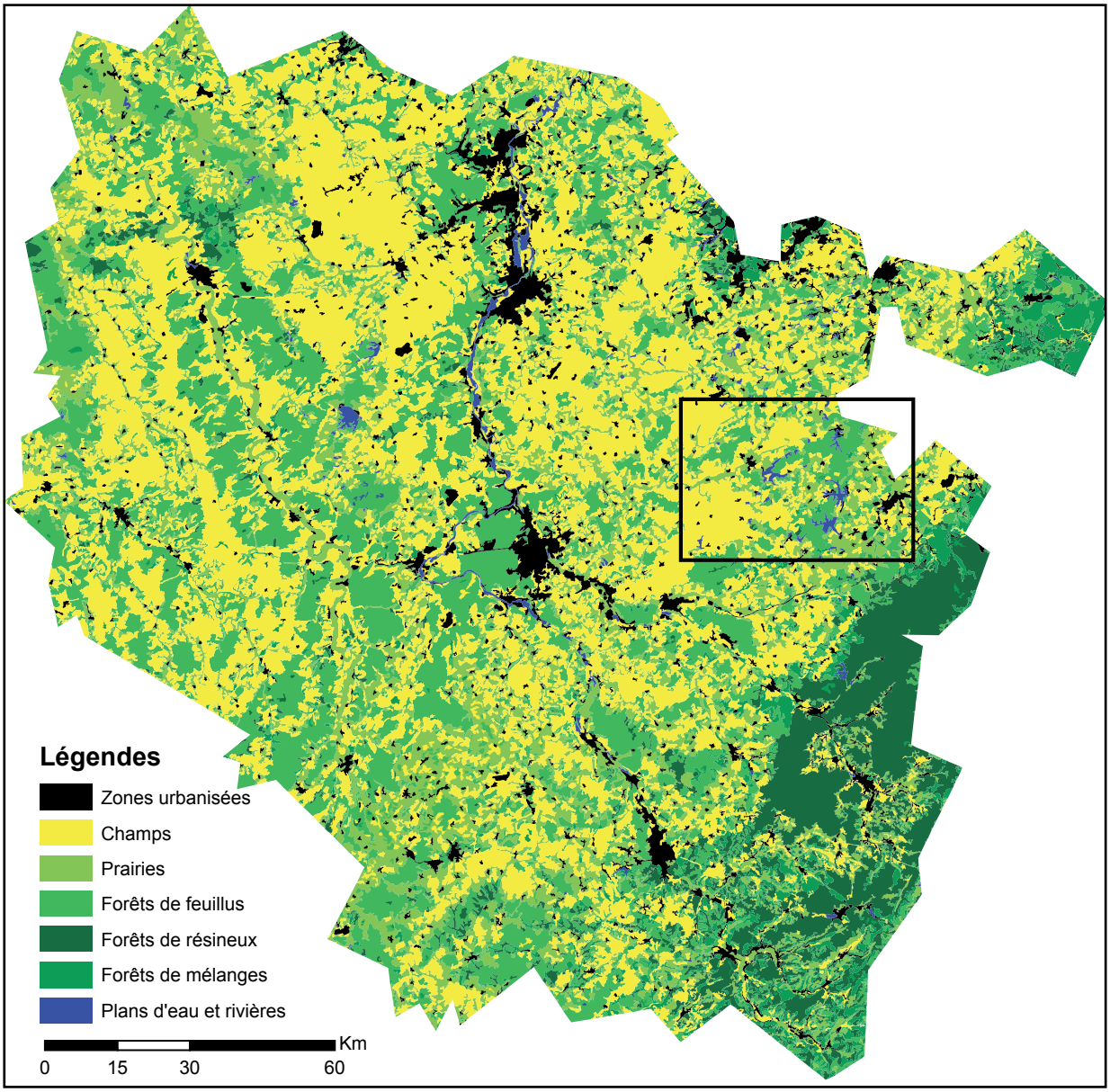


Figure 1.2 - Carte d'occupation des sols de la région Lorraine (France) basée sur les données Corine Land Cover de 2006. La zone géographique délimitée par un rectangle correspond à la région du pays des étangs dans le département de la Moselle.

valeur sylvicole est faite par le chêne pédonculé et sessile (*Quercus petraea*), le hêtre et divers résineux (épicéa, mélèze, douglas). La végétation herbacée est composée de plantes de mull acide (*Luzula maxima, Lonicera periclymerum*) et de moder (*Carex pilulifera, Hypericum pulchrum*). Les stations à limons épais sur marnes (> 50 cm) présentent des sols profonds et acides, bien aérés et à bonne réserve hydrique. Elles conviennent au chêne pédonculé et sessile, au hêtre et à l'érable sycomore (*Acer pseudoplatanus*). La végétation herbacée est caractérisée par des espèces de mull acide (*Luzula maxima*, *Lonicera periclymenum*) et mésotrophe (*Poa chaixi*, *Luzula pilosa* et *Milium effusum*).

2. Sites d'études

Nos sites d'études sont principalement localisés dans le département de la Moselle (57), à 60 km au sud-est de la ville de Metz autour des villes de Dieuze et de Sarrebourg. Le réseau hydrographique modèle cette région du « Pays des Étangs » abritant de nombreux lacs artificiels dont ceux du Lindre, du Stock et de Mittersheim. Les rivières de la Seille et de la Sarre, qui sont des affluants de la Moselle et donc des sous-affluants du Rhin, délimitent deux espaces géographiques distincts : la vallée de la Seille qui s'étend d'est en ouest de Dieuze à Metz, et la vallée de la Sarre orientée sud/nord du massif vosgien jusqu'en Sarre (Allemagne) et traversant la ville de Sarrebourg (Fig. 1.3).

3. Contexte historique et archéologique

Cette description du contexte historique dans notre zone d'étude, débute avec la période du second Age du Fer (La Tène) puisque nos données, décritent dans la suite de ce manuscrit, ne reseignent pas les périodes antérieures (premier Age du Fer, Age du Bronze et Néolithique).

L'Age du Fer est une période marquée par l'introduction d'un nouveau métal (le fer) et divisée en deux grandes phases : le premier Age du Fer (ou Hallstatt, 800-450 av. J.-C. / 2700-2400 cal. BP) et le second Age du Fer (ou La Tène, 450-52 av. J.-C. / 2400-2002 cal. BP).

3.1 Le second Age du Fer (La Tène, 450 à 52 av. J.-C. / 2400-2002 cal. BP)

Avant la conquête romaine, le territoire correspondant actuellement à la Lorraine est rattaché à la Gaule Belgique. Cette notion territoriale remonte aux textes antiques et se contruit en opposition à la Gaule Celtique et à l'Aquitaine (Fig. 1.4). Il semble ainsi que les Belges s'installent dans la région à partir du IIIe siècle av. J.-C. (Fichtl, 1994) puis sont rejoints par des populations d'outre Rhin (Cimbres, Teutons). Les peuples gaulois occupant les territoires lorrains ne sont réellement identifiés et nommés qu'à partir de la fin de l'Age du Fer (La Tène moyenne), il s'agit des Leuques (sud-Lorraine) et des Médiomatriques (nord-Lorraine).

Les Leuques occupent alors les territoires formant actuellement le département des Vosges, le sud de la Meuse et de la Meurthe-et-Moselle ; leur oppidum principal étant localisé à Boviolles (Vosges, Lorraine). Quant aux Médiomatriques, ils occupent alors des territoires formant actuellement le département de la Moselle, le nord de la Meuse et de la Meurthe-et-Moselle (Fig. 1.5). Selon Fichtl (2004), l'oppidum principal des Médiomatriques se trouvait au *Fossé des Pandours* à Saverne (Bas-Rhin, Alsace), tout du moins à la fin du IIe siècle av. J.-C et dans la première moitié du Ier siècle av. J.-C. Par la suite, cet oppidum décline probablement au profit de celui localisé sur les *Hauts-de-Sainte-Croix* à Metz (Moselle, Lorraine). Le territoire des

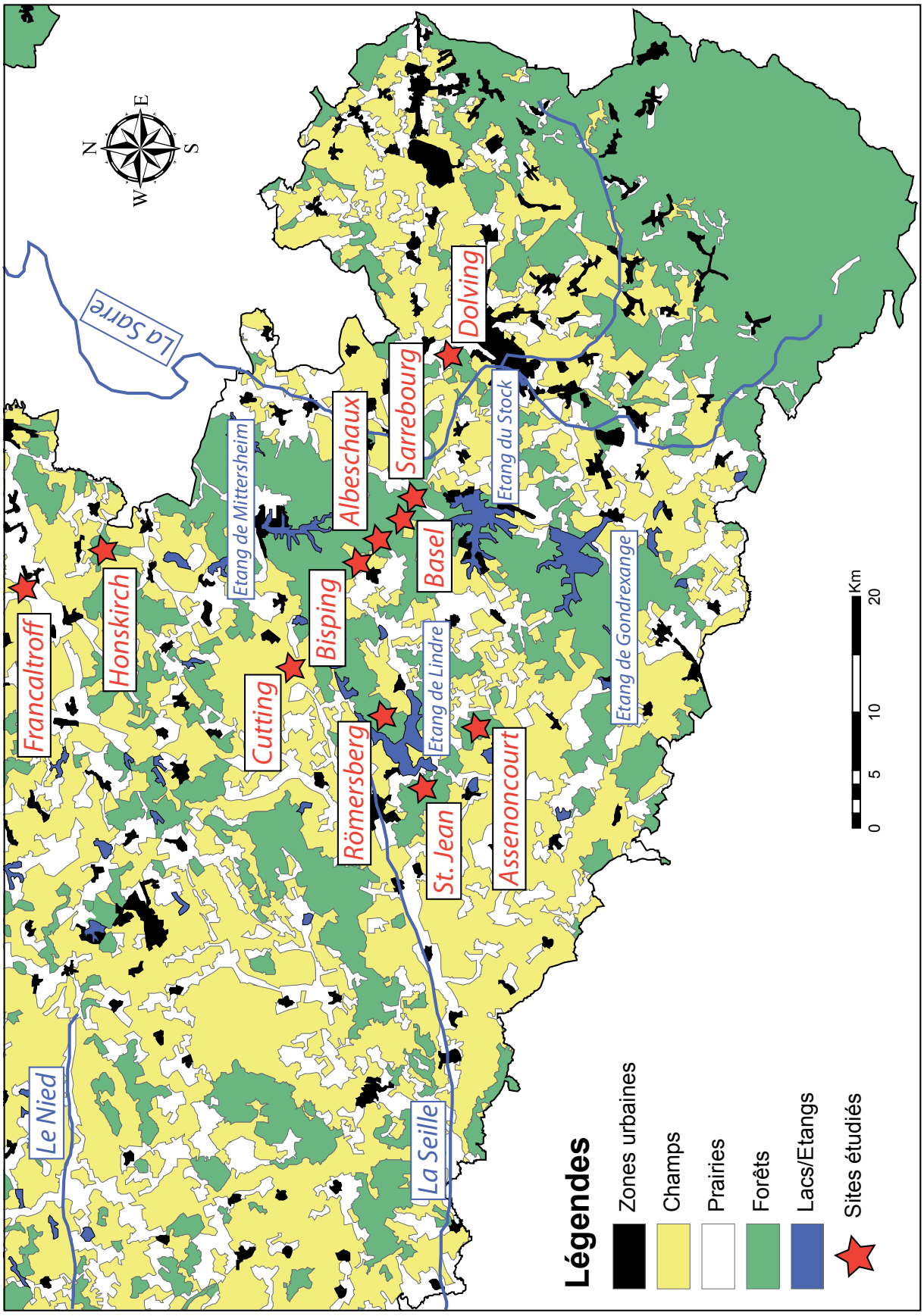


Figure 1.3 - Carte de localisation des sites étudiés dans ce travail de thèse dans la région du Pays des étangs (Lorraine, Moselle) autour des villes de Dieuze et de Sarrebourg.

Médiomatriques s'étendait également sur la Basse-Alsace (Bas-Rhin), mais au cours du Ier siècle av. J.-C., après la conquête romaine, le peuple germanique des Triboques s'intalle dans cette partie du territoire Médiomatrique (Ferdière, 2005 ; Fichtl, 2004).

L'ensemble du Plateau lorrain était donc sous la domination des Médiomatriques, exploitant les résurgences d'une couche de sel incluse dans des terrains du Keuper (Trias supérieur) à l'ouest de la ville de Dieuze (Moselle). Ces sources salées ont été exploitées dès le premier âge du Fer (Hallstatt) dans la vallée de la Seille (Olivier & Kovacik, 2006). Des récipients en argile servaient à récolter le produit de l'évaporation de la saumure. Une fois le sel cristallisé, le récipient était brisé afin de récupérer le pain de sel. Cette industrie protohistorique a généré 4,000,000 de m^3 de débris recouvrant une surface de 120 ha et pouvant atteindre exceptionnellement 10 m d'épaisseur. La richesse économique et historique de cette région est liée depuis l'Age du Fer à cette exploitation du sel, ayant fait l'objet d'un important commerce. La quantité et la provenance des pièces de monnaies découvertes autour du site du briquetage de la Seille, attestent de ces échanges économiques existant dès cette époque grâce à la commercialisation du sel (Berton, 1989).

3.2 La période gallo-romaine

La période gallo-romaine est encadrée par les deux dates symboliques de la capitulation de Vercingétorix (52 av. J.-C.) et du sac de Rome (476 ap. J.-C.), qui marque la chute de l'Empire romain d'Occident. Cette période gallo-romaine se divise en deux grandes parties, le Haut-Empire (52 av. J.-C. / 235 ap. J.-C.) dont la fin est généralement admise avec la fin de la dynastie des Sévères, et l'Antiquité tardive (235 ap. J.-C. / 475 ap. J.-C.).

3.2.1 Le Haut-Empire (52 av. J.-C. à 235 ap. J.-C. / 2002-1715 cal. BP)

Les Médiomatriques ne sont mentionnés que brièvement par César dans la *Guerre des Gaules* (livre VII, 75), mentionnant l'envoi de 5000 hommes au secours de Vercingétorix à Alésia. Ce peuple ne semble jamais avoir été directement sous l'influence de Rome, mais leur faible implication dans les soulevements gaulois du Ier siècle av. J.-C., entraînera une transition plutôt pacifique lorsque la région passe sous gouvernance romaine. La période du Haut-Empire correspond ainsi à une phase d'installation de cette influence romaine sur les population locales. La relative paix (*pax romana*) assurée par l'Empire s'accompagne d'un développement rural et urbain important.

Les villes de *Decem Pagi* (Tarquimpol) et de *Pons Saravi* (Sarrebourg) sont implantées le long de la voie antique reliant *Augusta Treverorum* (Trêves), capitale des Trévires et de la province de la Gaule Belgique, à *Argentoratum* (Strasbourg) en passant par le col du Donon (Berton, 1989

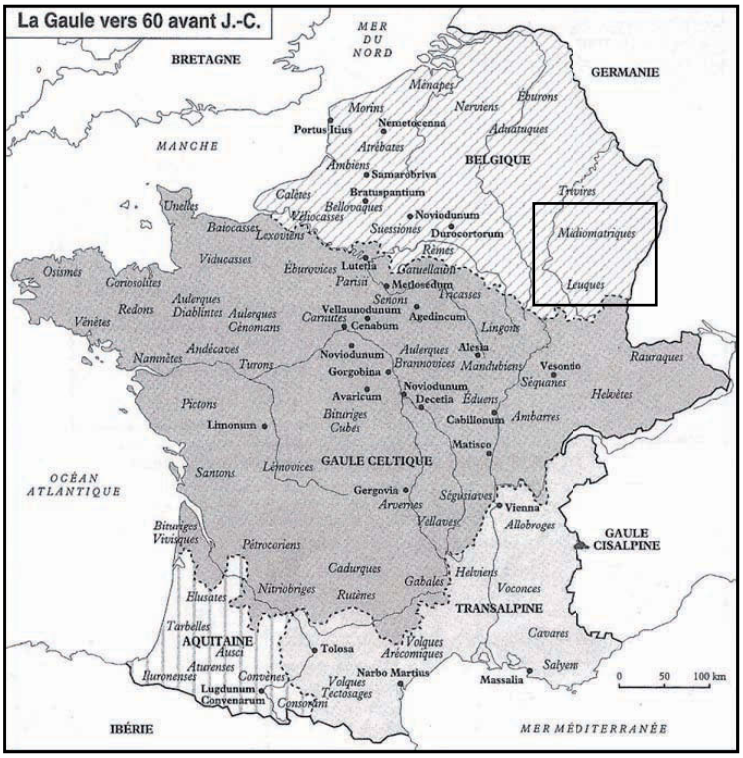


Figure 1.4 - Carte illustrant la séparation de la Gaule en 60 ap. J.-C. en trois grandes unités territoriales l'Aquitaine, la Gaule Celtique et la Gaule Belgique (extrait de Delaplace, 1995). La région délimitée par le carré noir symbolise les territoires Leuques et Médiomatriques.

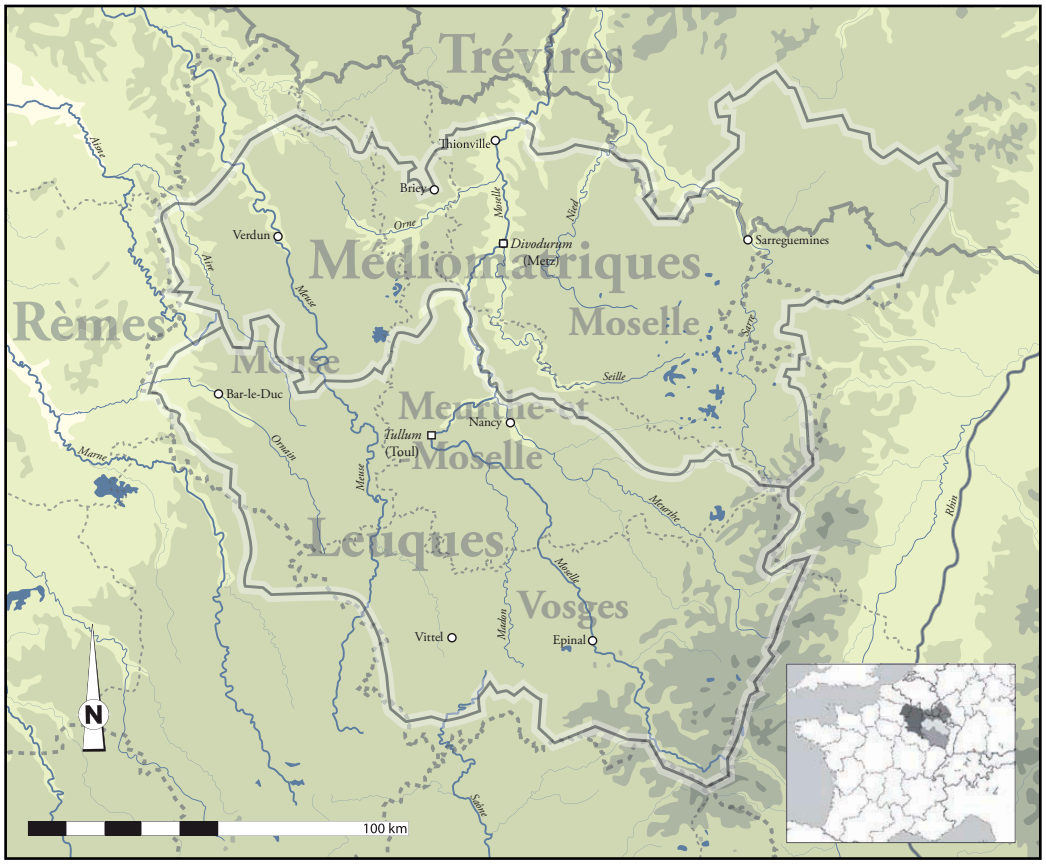


Figure 1.5 - Carte illustrant les limites territoriales des Médiomatriques et des Leuques selon les délimitations administratives actuelles (les ronds blancs symbolisent les villes actuelles ; les carrés blancs symbolisent les capitales de cités antiques). Carte extraite de Ancel (2010).

; Mathis, 2010). Les villes de Tarquimpol et de Sarrebourg sont mentionnées dans les *Itinéraire d'Antonin* (Cuntz, 1929) et dans la table de *Peutinger* (Desjardins & Longnon, 1876).

Decem Pagi devient alors un important centre économique grâce à l'exploitation du sel où la méthode du briquetage semble abandonnée à la période romaine et remplacée par l'utilisation de poêle à sel (Berton, 1989). Cette méthode revient à chauffer la saumure dans un grand récipient (une poêle) et n'implique plus l'utilisation de récipients en argile. A Tarquimpol, les fouilles archéologiques ont mises au jour de nombreuses structures publiques et religieuses (Henning *et al.*, 2010), la plus impressionnante étant le théâtre antique. Parallèlement, *Pons Saravi* (Sarrebourg) devient un point de passage obligatoire afin de franchir la rivière de la Sarre le long de la voie Romaine reliant Trêves à Strasbourg.

Les fouilles et les prospections aériennes ont identifié de très nombreux établissements ruraux sur le Plateau lorrain et les contreforts des Vosges (Heckenbenner & Meyer, 2004). Les zones les mieux prospectées par les archéologues (sud-est de Metz) décrivent un réseau dense d'habitations avec un site tous les 0,75 km² et leur relative stabilité durant les trois premiers siècles de notre ère (Laffite, 2004). Ce réseau dense est ponctué par de grandes villas telles que la villa de Saint Ulrich (Lutz, 1971, 1972) et son vaste domaine probablement de 200 ha près de la ville de Sarrebourg, ou la villa de Bassing, entre Dieuze et Mittersheim, découverte très récemment lors de fouilles dirigées par l'INRAP au cours de l'été 2010 (D. Lafitte, communication personnelle).

3.2.2 L'Antiquité tardive (235 à 476 ap. J.-C. / 1715-1474 cal. BP)

La transition entre le Haut Empire et l'Antiquité tardive est marquée par une « crise de l'Empire » caractérisée par des temps chaotiques et des luttes de pouvoir (Petit, 1994 ; Ferdière, 2005). Plus généralement, l'Antiquité tardive est une période ou l'influence romaine (*la romanité*) décline et se mélange à des apports chrétiens et des influences « barbares ». Longtemps cette période a été considérée comme des temps de décadence et d'assauts des peuples germaniques. Désormais les historiens l'identifient plutôt comme une période véritablement charnière entre l'Antiquité et la période médievale.

Dans notre zone d'étude, au cours de la seconde partie du IIIe siècle ap. J.-C, la ville de Tarquimpol (*Decem Pagi*) est partiellement détruite, sa superficie diminue et un grand rempart de fortification de 25 m à la base sur 7 m de hauteur et 450 m de circonférence, est construit au cours des IVème et Vème siècles ap. J.-C. (Henning *et al.*, 2010). Le construction de cette puissante fortification reflète, en comparaison avec la période du Haut-Empire, une certaine insécurité.

3.3 Le Moyen Age

La période du Moyen Age est divisée en deux grandes phases distinctes : le Haut Moyen Age (du

Ve / XIe siècles ap. J.-C.) et le Moyen Age classique (du XIIe / XVe siècles ap. J.-C.), que certains auteurs découpent également en deux parties, le Moyen Age classique et le Bas Moyen Age (du XIVe / XVe siècles ap. J.-C.).

3.3.1 Le Haut Moyen Age (Ve au XIe siècles ap. J.-C.)

Cette période se caractérise par l'abandon des villas antiques, la chute de l'usage des voies romaines (Henning *et al.*, 2010) et des changement profonds dans les modes de constructions des habitats avec une substitution de la pierre par des constructions en bois et en terre. Toutefois, de fortes continuités sont observables entre l'Antiquité tardive et l'époque mérovingienne (début du Haut Moyen Age). Ainsi, la découverte de plusieurs sépultures datant des VIème et VIIIème siècles après J.-C, sous l'église actuelle de Tarquimpol, suggère une continuité d'occupation des bords de Lindre au début de la période médiévale (Halsall, 1995). D'autres cimetières mérovingiens sont documentés à l'ouest de la ville de Sarrebourg par exemple sur la commune actuelle de Dolving (Flotté & Fuchs, 2004). Toutefois, les données archéologiques restent encore lacunaires pour cette période mais l'exploitation du sel est toujours attestée à dans les communes aux alentours de Dieuze (Vic, Moyenvic et Marsal) au cours du VIIe siècle ap. J.-C et contrôlée par les évêques de Metz.

3.3.2 Le Moyen Age classique (XIe au XVe siècles ap. J.-C.)

Localement, l'industrie du sel se développe avec la création de la saline de Dieuze dès le début du XIe siècle ap. J.-C. qui est gérée par les ducs de Lorraine. Durant la même période, de nombreux étangs artificiels (étangs de Lindre, du Stock et de Mittersheim) sont crées par endiguement des vallées au cours des XIe, XIIe et XIIIe siècles ap. J.-C. dans le but de subvenir aux besoins en poissons et en gibiers d'eau, indispensables à cette époque pendant les nombreux jours maigres (Degron, 1995).

A partir du XIIIe siècle ap. J.-C., la production de sel augmente fortement et se retrouve être un enjeu économique majeur entre les ducs de Lorraine et l'évêché de Metz. L'approvisionnement en bois pour les salines de Dieuze devenant problématique, les autorités décident alors d'allouer plusieurs massifs pour leur seul approvisionnement en bois afin d'assurer leurs besoins en combustible. Ainsi les massifs actuels de Saint Jean, d'Assenoncourt et du Römersberg, bordant tous trois l'étang de Lindre, passent sous la propriété des salines de Dieuze (Degron, 1995 ; Zeller, 2011).

3.4 La période Moderne et Contemporaine (XVe siècle ap. J.-C. à aujourd'hui)

La Guerre de Trente ans (1618-1648 cal. AD / 332-302 cal. BP) impacte largement la région de

Dieuze et entraîne une diminution notable de la population locale (Degron, 1995). Toutefois, l'industrie du sel se poursuit avec l'installation d'une saline Royale à Dieuze et la construction de fortifications autour de la ville de Marsal. Les massifs forestiers autour de Dieuze sont toujours utilisés en tant que réserves de bois pour l'usage des salines (Zeller, 2011). La plus ancienne carte disponible en Lorraine, la carte des Naudins (1728-1739, échelle 1 : 28 800), présente d'ailleurs des massifs forestiers aux limites très proches de celles que l'on observe aujourd'hui.

L'introduction du charbon en tant que combustible à partir de la révolution industrielle (1850), entraîne une diminution des besoins en bois des salines. Les biens forestiers alloués aux salines de Dieuze passent alors sous l'emprise de l'Office des Eaux et Forêts. Les dernières usines d'exploitation du sel fermeront à Dieuze en 1973.

Chapitre 2

Matériels & Méthodes



Document de couverture du chapitre

Photographie d’un sondage manuel effectué à l’aide d’une sonde de type GYK sur la mardelle tourbeuse d’Albestroff (parcelle 154). Cliché de Frédéric Ritz.

1. Palynologie

1.1 Prélèvement et échantillonnage

Les prélèvements ont été réalisés à l'aide d'une sonde russe manuelle (type GYK, 50 cm de longueur, 5 ou 8 cm de diamètre). Certaines séquences (Bisping et H2) ont été prélevées à l'aide de réglettes métalliques sur des fosses ouvertes lors des fouilles archéologiques. Le pas d'échantillonnage est adapté au type de sédiment (argileux, organo-minéral ou tourbeux), le but étant de fournir une image pollinique à une résolution temporelle la plus constante possible. Ainsi nous avons prélevés des échantillons à un pas de 2 cm dans les sédiments argileux et de 4 cm dans les sédiments argilo-organique et dans les sédiments tourbeux.

1.2 Préparation chimique et analyses polliniques

Les échantillons sont préparés selon la méthode classique de Faegri & Iversen (1989). Au moins 500 grains de pollen de plantes terrestres (*TLP, Total Land Pollen*) sont comptabilisés pour chaque échantillon. Le nombre de grains de pollen identifiés et comptabilisés peut être multiplié par un facteur 2 ou 3, lorsqu'un pollen arboréen (*Alnus*, *Betula*, ...) domine le comptage pollinique. L'identification des pollens et des spores est basée sur une clef de détermination (Beug, 2004), des livres de photographies (Moore *et al.,* 1991 ; Reille, 1992-1998) et par comparaison avec la collection de référence disponible au laboratoire Chrono-environnement (Besançon).

Les pollens de graminées (Poaceae) et de céréales (*Cerealia*-type) sont différentiés par leur taille (40 µm), l'épaisseur et le diamètre de leur annulus. Généralement, cette distinction entre Poaceae sauvages et Poaceae cultivées se base sur un diamètre discriminant de 38 µm (Andersen, 1979). Mais dans le cadre de ce travail de thèse, le choix de la limite de taille à 40 µm est lié à une volonté d'éviter de comptabliser les grains de pollen de certaines espèces de Poaceae sauvages, identifiées actuellement autour de nos mardelles, et produisant des grains de pollen d'une taille entre 38 et 40 µm de diamètre (Dickson, 1988). Le choix de ce diamètre seuil engendre une exclusion potentielle de certains grains de pollen de céréales, mais nous assure de ne pas les sur-quantifier. Les grains de pollen de *Cannabis* et *Humulus* ne peuvent être différenciés et sont regroupés dans *Cannabis/Humulus*, de même pour *Typha angustifolia* et *Sparganium* regroupés dans *Sparganium*-type.

1.3 Représentation des diagrammes polliniques

Certains travaux botaniques antérieurs listent les espèces arbustives et herbacées typiques des « mardelles » en Belgique, au Luxembourg et dans le rord du département de la Moselle (Forêt de Sierck) (Barth *et al.*, 2001 ; Thoen & Herault, 2006 ; Herault & Thoen, 2008). La compilation de 653 inventaires floristiques dans notre zone d'étude (Forêt de Albestroff, de Fénétrange et

de Parroy) (Lequy, 2009) confirme et affine la liste des espèces typiques de ces structures en prouvant statistiquement leur spécificité par rapport à la végétation forestière environnante (*cf. Chapitre 6*).

Grâce à ces travaux, il nous est possible de différencier (1) des taxons reliés aux variations du couvert forestier ou de l'emprise anthropique autour de nos structures, (2) des taxons polliniques statistiquement inhérents aux modifications de végétation de la structure.

Les diagrammes polliniques d'anthropisation sont donc calculés en prenant en compte l'ensemble des pollens de plantes terrestres (Total Land Pollen) mais, en plus des taxons généralement exclus de la somme pollinique totale tels que les pollens de plantes aquatiques (*Myriophyllum*, *Nymphaea*, *Potamogeton*, *Sparganium*-type et *Typha latifolia*) et d'herbacées mésohygrophiles (*Alisma plantago-aquatica*, Cyperaceae, *Filipendula*-type), les pollens de taxons arboréens tels que *Alnus*, *Betula*, *Salix* et *Viburnum* sont également soustrais.

En utilisant ces taxons exclus, il est possible de retracer l'évolution de la dynamique de colonisation végétale de nos structures (*cf. Chapitre 6*). Les pollens de Poaceae sont utilisés dans les deux catégories car ils peuvent être liés aux pratiques pastorales (pâtures, prairies de fauches) mais également à une colonisation de graminées autour de la mardelle.

Le choix des taxons considérés comme des indicateurs de l'anthropisation (IPA, Indicateurs Polliniques d'Anthropisation) se base sur des travaux antérieurs (Behre, 1981, 1986, 1988) et peuvent être regroupés en indicateurs pastoraux (Apiaceae, Anthemideae, *Centaurea jacea/nigra*, Cichorioideae, *Plantago lanceolata*, Ranunculaceae et *Rumex acetosa/acetosella*), en indicateurs rudéraux/messicoles (*Artemisia*, *Centaurea cyanus*, Chenopodiaceae, *Papaver*, *Plantago major/media*, *Polygonum aviculare* et Urticaceae) et en indicateurs de plantes cultivées (*Cerealia*-type, *Secale*-type, *Cannabis/Humulus* et *Fagopyrum*).

2. Les Microfossiles Non Polliniques (MNPs)

Lors de ce travail de thèse, nous nous sommes focalisés sur quelques Microfossiles Non Polliniques. Les MNPs identifiés, à l'aide du système de Van Geel (2002) et comptabilisés sont uniquement des champignons coprophiles (*Sporormiella*-type/T113, *Podospora*-type/T368, *Cercophora*-type/T112, *Sordaria*-type/T55A). Nous nous sommes focalisés sur ces champignons coprophiles car la littérature les décrivent comme de bons indicateurs des activités pastorales aux cours des deux derniers millénaires (Cugny *et al.*, 2010).

Sporormiella-type/T113 (Fig. 2.1a) est un ascomycète inféodé aux déjections des herbivores et utilisé comme indicateur de la présence de bétail (Davis, 1987 ; Davis & Shafer, 2006 ; Rapper & Bush, 2009).

Podospora-type/T368 (Fig. 2.1d) est présent dans de nombreux sites archéologiques (Van Geel

et al., 2003) et, comme Sporormiella-*type*, est un bon indicateur du pastoralisme (Innes & Blackford, 2003) toutefois ce champignon est moins fréquent que les autres types de champignons coprophiles (Van Geel *et al.*, 2007).

Les ascospores de *Sordaria*-type/T55A (Fig. 2.1b) sont communs dans les échantillons archéologiques (Van Geel *et al.*, 2003, 2007) mais se développent dans la matière organique en décomposition (bois, déjections…) (Mighall *et al.*, 2006).

Cercophora-type/T112 (Fig. 2.1c) est un spore de champignon coprophile pouvant être retrouvé dans le bois en décomposition, les tiges d'herbacées ou les feuilles (Van Geel *et al.*, 2003) et semble donc plus inféodé à la matière organique.

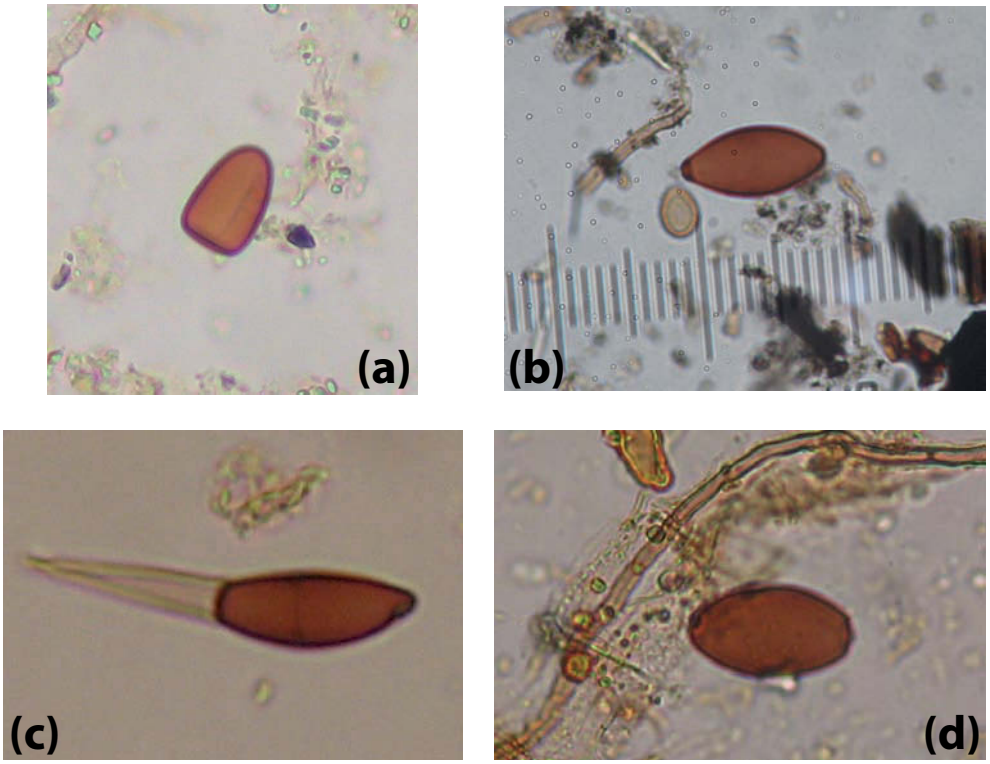


Figure 2.1 - Photographies de spores de champignons coprophiles (MNPs) de (a) *Sporormiella*-type (T.113), (b) de *Sordaria*-type (T.55A), (c) de *Cercophora*-type (T.112) et de *Podospora*-type (T.368). Clichés Isabelle Jouffroy-Bapicot.

Les MNP sont généralement exprimés en pourcentages en fonction de la somme pollinique totale plus les MNP comptés (TLP + MNPs). Toutefois, l'introduction de tablettes de spores exogènes (*Lycopodium clavatum*) lors des préparations polliniques permet de calculer les concentrations de MNPs par gramme de sédiment sec (Stockmarr, 1971). Toutefois, ces tablettes de lycopodes ne purent être utilisées que pour les échantillons des séquences de Sarrebourg (SAR) et de Bisping (BIS). Sur les séquences d'Assenoncourt (ASS) et de St. Jean (STJ), les concentrations sont calculées selon la méthode volumétrique basée sur le poids sec de l'échantillon, le volume obtenu après la préparation chimique et le volume introduit entre lame et lamelle lors du comptage

pollinique (Gaillard, 1984 ; Ruffaldi, 1993).

3. Les datations

3.1 Datations radiocarbone AMS

Les datations radiocarbone AMS (**A**ccelerator **M**ass **S**pectrometry) sont réalisées par le laboratoire *Poznan Radiocarbon Laboratory* (Pologne) sur des macro-restes triés (graines, feuilles ou charbons). Toutes les datations sont calibrées à l'aide du logiciel Calib 6.0.2, à un intervalle de confiance de 2σ, et suivant la courbe de calibration de l'Intcal09 (Reimer *et al.*, 2009). L'emplacement des datations radiocarbone a été dicté par une volonté d'encadrer au mieux chaque changement sédimentaire.

3.2 Modèles âge-profondeur

Afin de représenter nos diagrammes en échelle chronologique et non plus stratigraphique, nous avons construit des modèles âge-profondeur sur l'ensemble de nos séquences. Plusieurs méthodes sont possibles que ce soit la méthode *mixed-effect regression* (Heegaard *et al.*, 2004), les méthodes de lissage (*smooth*, *spline*) ou la méthode linéaire (Blaauw, 2010). Le choix du type de modèle est influencé par la dilatation de la séquence (nombre d'années par cm), les variations potentielles du taux de sédimentation et la période recouverte par l'analyse (plateau de calibration à certaines périodes). Ces paramètres influencent indirectement la qualité du modèle obtenu. De part l'incertitude de calibration inhérente aux datations radiocarbone, l'âge du sédiment peut évidemment osciller au sein de l'incertitude du modèle.

Nous construisons les modèles âge-profondeur à l'aide du logiciel Clam développé par Blaauw (2010), utilisable à l'aide du logiciel gratuit R (R devlopment Core Team, 2009), selon la méthode de lissage *spline* (facteur 0,2). L'intérêt de ce logiciel est de prendre en compte la distribution de probabilité des datations radiocarbone au sein de l'intervalle de calibration à 2σ, alors que d'autres méthodes de construction de modèles âge-profondeur considèrent une équiprobabilité au sein de cet intervalle de calibration.

Sur les séquences d'Assenoncourt (ASS) et du Römersberg (RÖM), la présence d'une lame d'eau sous le radeau de sphaigne crée un décalage entre la profondeur mesurée sur le terrain et la longueur de la sédimentation. Ce « trou d'eau » représente 40 cm à Assenoncourt (entre 161 et 201 cm de profondeur) et 50 cm au Römersberg (entre 283 et 333 cm de profondeur). Afin de savoir si cet espace représente une lacune de sédimentation, nous avons réalisés sur la séquence du Römersberg des datations radiocarbone au sommet et à la base de cet espace. Les datations obtenues à 282 cm (740 ± 40BP) et à 343 cm (725 ± 30BP) de profondeur sont quasiment identiques (*cf. Chapitre 5*). Ce trou d'eau ne représente donc pas une lacune sédimentaire, du

moins d'une temporalité non perceptible par des datations radiocarbone. Ainsi lors de la création de nos modèles âge-profondeur, une correction des profondeurs correspondant à ces trou d'eau sera appliquée pour les séquences d'Assenoncourt et du Römersberg.

Les échelles temporelles seront ainsi présentées en datations calibrées (*cal.*) et exprimées en BP (*Before Present*). Ce terme désigne les âges à partir de l'année 1950 ap. J.-C., correspondant donc à 0 cal. BP. Il s'agit d'une expression standard pour les dates obtenues par des méthodes de datation absolue tel que le ^{14}C.

4. Analyse des données polliniques

4.1 Principe

Le pourcentage de grains de pollen arboréens (Arborean Pollen/Total Land Pollen) est utilisé en tant qu'indicateur de l'ouverture de l'espace (Heim, 1970) et les Indicateurs Polliniques d'Anthropisation (IPA) (Behre 1981, 1986, 1988) afin de caractériser le type de d'activité anthropique développée sur le bassin versant (pâtures, cultures …). Toutefois les variations du rapport AP/T peuvent dépendre de nombreux facteurs tels que la taille du capteur utilisé (lac, tourbière, petites dépressions…), les apports locaux plus ou moins importants (végétation installée sur la structure), le transport, la sédimentation et de nombreux autres facteurs (Gaillard *et al.*, 1992 ; Broström *et al.*, 1998). Pour leur part, les IPA dépendent du contexte géographique (contexte climatique et altitudinal), des pratiques anthropiques inhérentes à certaines régions (abattis-brulis par exemple) et sont difficilement séparables de façon stricte dans des catégories d'indicateurs pastoraux, de culture ou de présence anthropique.

L'utilisation d'outils statistiques afin d'affiner la compréhension des analyses polliniques s'est développée depuis quelques années (Birks *et al.*, 1996 ; Kerig & Lechterbeck, 2004 ; Lechterbek *et al.*, 2009) mais ne sont pas encore utilisées en routine. Ces méthodes utilisent l'ensemble des taxons polliniques identifiés lors des comptages, même les taxons polliniques (aquatiques et spores) généralement exclus de la somme pollinique totale (Total Land Pollen) lors de la confection des diagrammes. Ce sont des méthodes d'analyses sans *a priori* sur la valeur indicatrice de tel ou tel taxon et intégrant non plus la seule présence/absence d'indicateurs polliniques d'anthropisation mais l'ensemble de la dynamique d'ouverture et de mise en valeur du paysage. En effet, ces changements paysagers engendreront des modifications floristiques sur la végétation autour du capteur sédimentaire mais également sur la végétation implantée dans cette structure (plantes aquatiques et méso-hygrophiles, Cyperaceae, Poaceae, …). Ces méthodes multivariées ont en commun l'avantage de tenir compte des corrélations ou anti-corrélations de présence entre tous les taxons identifiés, corrélations qui ne sont pas prises en compte dans les indices classiques. Elles consistent à construire des axes multivariables, combinaisons linéaires

des taxons d'origine, qui résument la plus grande part de l'information présente en quelques composantes indépendantes. Dans une région donnée et pour une couverture temporelle donnée, leur robustesse augmente avec le nombre de sites pris en compte.

Nous avons choisi ici d'utiliser l'analyse en composantes principales, l'une des méthodes les plus simples et les plus éprouvées, qui est adaptée aux mesures quantitatives telles que les les comptages polliniques. On en trouvera une description détaillée dans Lebart *et al.* (2006).

4.2 Méthodologie

Nous travaillons sur 393 échantillons analysés dans 7 sites (Assenoncourt, Albeschaux, Bassel Bisping, Römersberg, Saint Jean et Sarrebourg). Seuls les taxons polliniques présents dans au moins deux sites sont conservés, soit 110 taxons. Les comptages sont ramenés en pourcentage du total par niveau et par site. Chaque échantillon a le même poids dans l'analyse. Ceci implique que les sites les plus intensément échantillonnés jouent un rôle plus important dans les analyses que les autres. Mais des analyses parallèles menées en pondérant chaque échantillon de façon inversement proportionnelle au nombre total d'échantillons du site, de façon à donner à chaque site le même poids dans l'analyse, ont donné des résultats très similaires. Ces pourcentages sont bien sûrs distribués de façon extrêmement dissymétrique avec une majorité de très faibles valeurs. On applique donc une transformation √arcsin (pourcentage/100) améliorant la distribution des pourcentages avant l'analyse en composante principale. En raison de leur caractère atypique, deux séquences (Francaltroff et la pluie pollinique actuelle à Assenoncourt) sont placées en supplémentaires dans l'analyse : les échantillons sont positionnés *a posteriori* dans les analyses mais ne sont pas utilisés pour les calculs des axes factoriels. L'utilisation d'une rotation varimax individualise de façon plus satisfaisante nos axes factoriels.

5. Sédimentologie

Des échantillons sont prélevés à volume constant (2 cm^3) à l'aide d'un emporte pièce, en parallèle des échantillons palynologiques sur 5 séquences sédimentaires (Assenoncourt, Bisping, Römersberg, Sarrebourg et St Jean) pour des mesures de perte au feu (LOI, Loss On Ignition). Cette méthode consiste à chauffer à différentes températures et durées des échantillons puis de mesurer après chaque étape la perte de poids afin de caractériser les proportions de matière organique (MO), de carbonates et de silicates contenus dans le sédiment.

Les échantillons sont placés dans un four successivement à 105 °C durant 2 heures (humidité), à 550 °C durant 5 heures (MO) et à 950 °C pendant 2 heures (carbonates). La différence de poids entre l'échantillon final et l'échantillon initial sec renseigne la proportion de silicates. Le

prélèvement à volume constant est essentiel pour connaître la densité sèche du sédiment (DS en g/cm^3).

Ces mesures sont utilisées afin de calculer des épaisseurs de sédiments allochtones accumulés et des flux sédimentaires au cours des temps historiques (*cf. Chapitre 5*) (Bossuet *et al.*, 1996). L'identification du matériau d'érosion est facilitée dans notre cas d'étude, car le sédiment n'étant jamais carbonaté, seule la matière organique (MO) retranscrit les apports autochtones de matériau. Le taux d'accumulation réel ($g/cm^2/an$) est mesuré en intégrant les résultats de la perte au feu et correspond alors à la valeur de densité sèche des silicates ($g_{de\ si}/cm^3$) multipliée par le taux de sédimentation (cm/an).

Par la suite, la surface du capteur sédimentaire (m^2) et du bassin versant (m^2) sont intégrés aux données précédemment acquises afin de retranscrire la perte de sol (mm/an) sur ce bassin versant. Ce calcul nécessite de fixer une valeur de masse volumique des sols érodés qui est fixé à 1 t/m^3 en se basant sur des mesures de densités d'échantillons de sols de l'horizon A actuel. Ces bilans permettent de replacer les distributions et les épaisseurs actuelles des sols dans une vision temporelle plus longue (*cf. Chapitre 5*).

6. LiDAR (Light Detection and Ranging)

6.1 Principe

La prospection LiDAR (Light Detection and Ranging) est méthode de télédétection basée sur l'analyse des propriétés d'une lumière laser envoyée par un émetteur haute-fréquence. Il utilise un laser à impulsion à la différence d'un radar utilisant les ondes radios. Leurs fonctionnements sont identiques seul le domaine spectral et le type de faisceau utilisés diffèrent. La prospection LiDAR est basée sur l'envoi d'un laser, à partir d'un hélicoptère ou d'un avion de tourisme, et l'analyse de la partie réfléchie par les surfaces rencontrées par le laser (feuilles, troncs, sol…). L'instrument mesure le temps mis par l'onde pour réaliser l'aller-retour jusqu'à l'objet cible. La vitesse de l'onde laser étant connue (vitesse de la lumière), la durée entre l'émission et le retour peut être convertie en distance. Le laser (émetteur-récepteur) est couplé à un système de positionnement GPS, une station GPS au sol et une centrale de navigation interne (Fig. 2.2) (Ackermann, 1999).

Les précisions des données brutes enregistrées sont de l'ordre du centimètre en plan (z, y) et du décimètre en altitude (z). Le laser émettant de 10 000 à 30 000 impulsions par seconde (Joinville *et al.*, 2003), il est possible de mesurer l'altitude d'un terrain avec une précision variable suivant la densité de points au sol obtenus (nombre d'impulsions par m^2). Les valeurs inconnues sont interpolées à partie des valeurs du voisinage afin d'obtenir une grille régulière à partir du semis de points. Ainsi le résultat obtenu se présente sous la forme d'un **M**odèle **N**umérique de **T**errain

(MNT) utilisable sous un logiciel d'information géographique (SIG). A partir de ce MNT, nous créons des ombrages fournissant des images nécessaire pour une visualisation pratique des données d'élévation topographique.

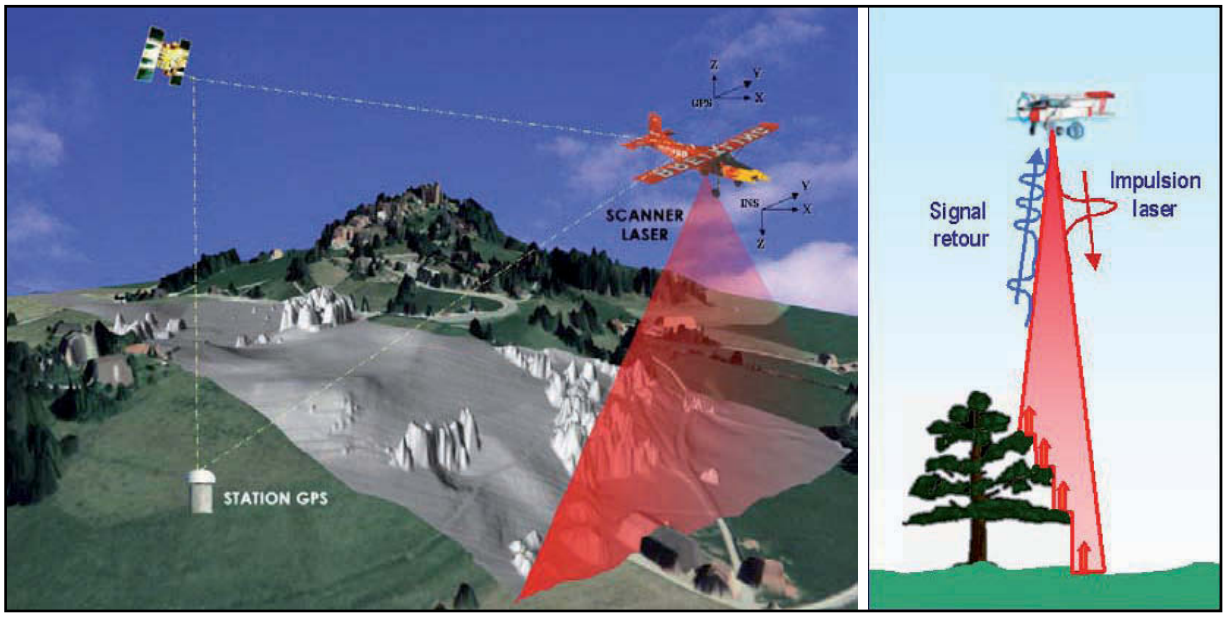


Figure 2.2 - Schéma explicatif de la technique LiDAR (LIght Detecting And Ranging) basée sur l'envoi d'un laser à partir d'un système aéroporté et l'analyse de la partie réfléchie par les surfaces rencontrées (feuilles, troncs, sol).

Dans la région du Plateau lorrain, nous avons bénéficiés de deux vols LiDAR couvrant des zones géographiques distinctes mais également des perspectives scientifiques différentes (Fig. 2.3).

6.2 Le vol LiDAR LGV

Ainsi, la propection LiDAR LGV a été réalisée au cours de l'hiver 2007, le long du futur tracé de la ligne LGV reliant Metz à Strasbourg. L'utilisation première de ce vol étant de faciliter la détection de structures archéologiques avant la mise en place sur le terrain des fouilles préventives par l'Institut National de Recherches Archéologiques Préventives (INRAP).

Cette prospection LiDAR recouvre une bande de 80 km de long sur 1 km de large et une superficie de 104 km². Elle traverse le département de la Moselle d'ouest en est, à partir de Louvigny (sud de Metz) jusqu'aux contreforts des Vosges (col de Saverne, Alsace).

La densité d'émission est forte (10 impulsions par cm²) fournissant un Modèle Numérique de Terrain (MNT) d'une précision décimétrique. Cette précision du MNT permettra wde réaliser un inventaire *a priori* exhaustif des mardelles actuellement implantées en milieux ouverts (prairies, champs) ou forestiers (*cf. Chapitre 3*) et d'identifier potentiellement des linéaires de parcellaires agraires antiques aujourd'hui implantés sous couvert forestier (*cf. Chapitre 4*).

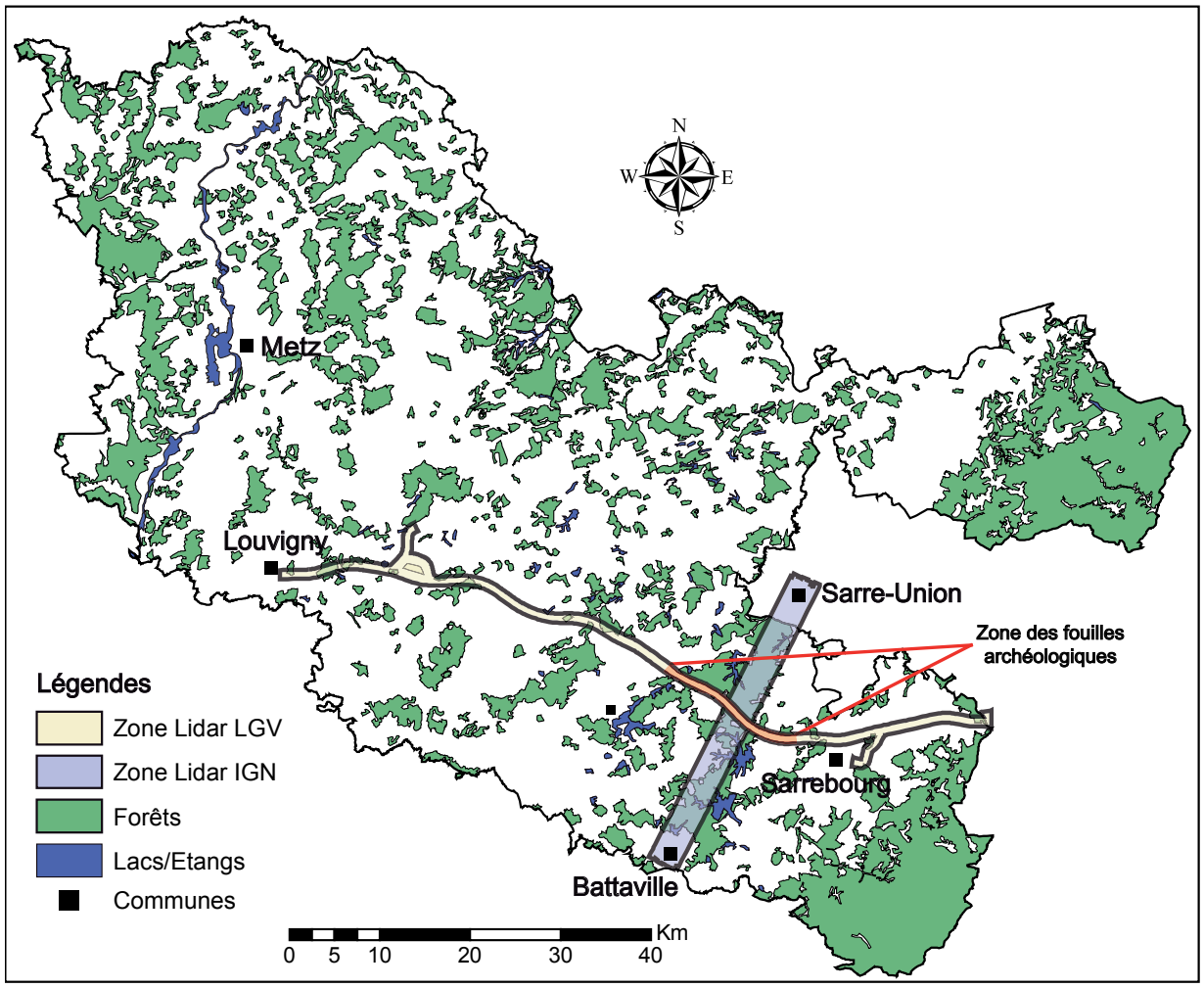


Figure 2.3 - Localisation des deux bandes LiDAR (Light Detection And Ranging) LGV et IGN utilisées dans ce manuscrit et de la zone des campagnes de fouilles archéologiques (en rouge) réalisées par les équipes de l'INRAP de Metz en Mai-Juin 2009 (Goepp, 2010) et en Juin-Juillet 2010 (Gazenbeek, en cours ; Klag, en cours).

6.3 Le vol LiDAR IGN

Il fut réalisé au cours de l'été 2009, pendant la période feuillée, dans le cadre d'une utilisation première par les écologues pour l'estimation des hauteurs de peuplements sylvicoles.

Cette prospection LiDAR représente une bande de 35 km de long sur environ 3,5 km de large couvrant une superficie de 121 km². Cette zone traverse la partie est du département de la Moselle dans la direction sud-ouest/nord-est des villes de Battaville (au nord de Lunéville) à Sarre-Union en Alsace.

Les données sont d'une qualité plus faible (4 impulsions par m²) fournissant un MNT d'une précision à un mètre. Cette couverture feuillée crée un biais important en contexte forestier suivant la densité du feuillage et l'âge du peuplement (perchis, gaulis et futaie) (Fig. 2.4).

La période de prospection des vols LiDAR LGV (hiver) et IGN (été) engendre une grande différence de qualité des MNT et donc des images à partir desquelles nous travaillerons. Ceci est

Figure 2.4 - Orthophotographie (a) et imagerie LiDAR (b) (ombrage 315°, élévation 45°) de la même zone de la bande LiDAR IGN. Les ronds blancs pro i$f j ^db IfA>O p1kq abp aD̆m0bppf1kp fabkqf ª D̆bp comme des mardelles. Entre les deux traits noirs, un parcellaire ancien est perceptible dans la parcelle ou le couvert forestier est très clairsemé.

particulièrement visible pour la zone de recoupement entre nos deux prospections LiDAR (Fig. 2.5). Dans la suite de ce manuscrit (*cf. Chapitre 4*), nous nous attacherons à étalonner l'impact de ces différences de résolution entre nos deux jeux de données LiDAR.

7. Études morphologiques

7.1 Relevés manuels

En dehors de la bande LGV, aucune excavation mécanique n'est possible dans les mardelles tourbeuses étudiées (Assenoncourt, Römersberg, Sarrebourg et St. Jean). Leurs descriptions morphologiques sont relevées à l'aide d'une sonde manuelle en mesurant la profondeur de contact avec le substrat géologique tous les deux mètres le long d'un transect.

7.2 Campagnes de fouilles

Par la suite nous avons bénéficié de deux campagnes de fouilles archéologiques confiées par RFF (Réseaux Ferrés de France) à l'INRAP (Institut National de Recherche en Archéologie Préventive) au cours des mois de Mai-Juin 2009 (Responsable Sébastien Viller) et de Juin-Juillet 2010 (Responsable Thierry Klag) sur le tracé de la future ligne LGV Est (*cf. Fig. 2.3*).

Lors des campagnes de 2009 et 2010, des tranchées au centre de « mardelles » furent ouvertes sur des structures actuellement comblées en contexte forestier et agricole. En plus des prélèvements de carottes sédimentaires, le principal intérêt était de pouvoir observer et décrire l'ensemble de la sédimentation ainsi que l'implantation de la structure dans son contexte géologique. Des analyses complémentaires de granulométrie, de carbone, d'azote et du phosphore servirent à étayer nos différenciations et descriptions d'unités stratigraphiques (US) composant la sédimentation et le socle géologique.

Lors de la campagne 2010, 7 mardelles ont été vidées et ouvertes suivant la même méthodologie et dans la même optique que lors de la campagne de 2009 puis prélevées et fouillées afin d'y rechercher des vestiges archéologiques.

7.3 Prospections géophysiques

Les prospections géophysiques sont des méthodes non destructives appliquées fréquemment au domaine de l'archéologie. Ces prospections ont fait l'objet d'une collaboration avec des membres du laboratoire Chrono-environnement de Besançon (Clément Laplaige, Gilles Bossuet et Jean-Pierre Simonnet) et Christian Camerlynck de l'Université Pierre et Marie Curie, Paris 6. Deux méthodes de prospection ont été testées sur deux structures différentes, la mardelle de Dolving implantée sur les calcaire du Muschelkalk et prospectée au radar sol et la mardelle de Belles-Forêts implantée sur les marnes du Keuper inférieur et prospectée à l'aide de panneaux

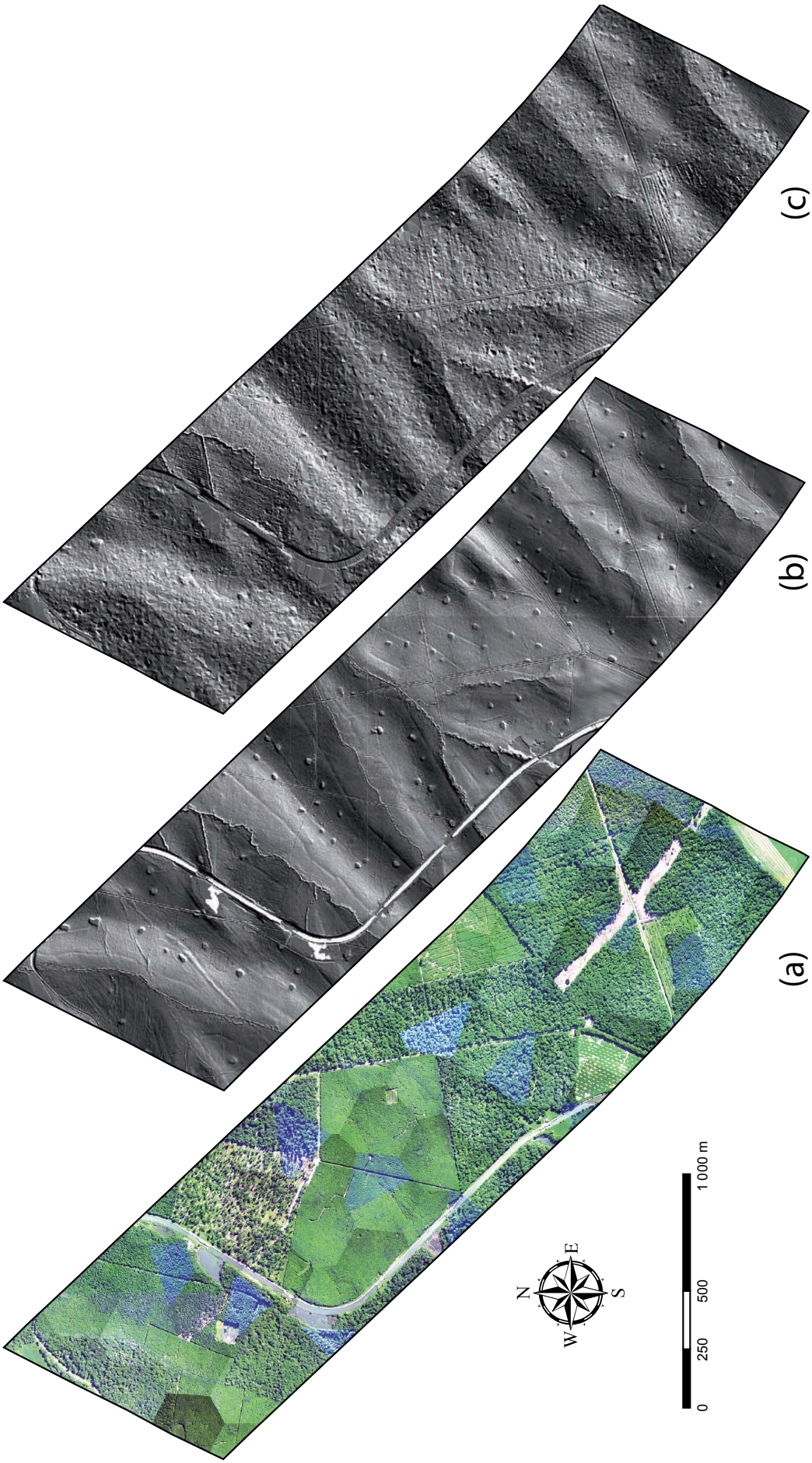


Figure 2.5 - Orthophotographie (a), image de la prospection LiDAR LGV (ombrage 315°, élévation 45°) (b) et image de la prospection LiDAR IGN (ombrage 315°, élévation 45°) de la même fenêtre géographique correspondant à la zone de recoupement dse deux bandes LiDAR (*cf. Chapitre 2*) illustrant la différence de résolution liée à la période de prospection (feuillée ou non).

électriques.

7.3.1 Prospection radar sol

La prospection radar sol (GPR, Ground-Penetrating Radar) est une méthode de prospection électromagnétique non destructive. Son principe repose sur l'étude de la propagation et des réflexions d'impulsions électromagnétiques émises dans une bande de fréquence de largeur comparable à celle de la fréquence centrale d'émission (entre 10 MHz et 1GHz). La vitesse (v) de propagation des ondes est liée à la permittivité diélectrique (ε) du sol par la formule $v = c/\varepsilon$ où c est la vitesse de la lumière dans le vide. Dans l'air ε vaut environ 1, dans l'eau 80 et dans les argiles de 5 à 40. Les interfaces entre les structures du sol sont alors mises en évidence par la réflexion des ondes radars selon le contraste de permittivité diélectrique de part et d'autre de l'interface. L'utilisateur parcourt un profil en gardant une antenne émettrice et une antenne réceptrice à distance fixe. La méthode de prospection doit être légèrement adaptée pour travailler sur des milieux d'ambiances humides tels que les mardelles (Fig. 2.6).



Figure 2.6 - Photographies des prospections au radar sol (antennes GPR 200 MHz) sur une mardelle prospectable (a) et la version pour la prospection en milieux très humides (b) avec l'implantation du matérial dans un radeau. La mardelle prospectée (b) est celle de Dolving dont les résultats sont disponibles dans cette thèse (*cf. Chapitre 3*).

En chaque point de ce profil, un « pulse » est émis et se propage, la succession des différents échos est enregistrée à l'antenne de réception. Toutes les traces acquises le long du profil sont alors rassemblées pour former une coupe-temps, pseudo image verticale sous profil. La vitesse réelle de propagation est estimée pour permettre la conversion temps-profondeur. Cette méthode permet une reconnaissance des milieux stratigraphiques et de délimiter l'extension verticale et

latérale des structures si le contraste de permittivité est suffisant. L'enregistrement successif de profils proches améliore l'interprétation et permet de réaliser des reconstructions en 3D des structures et de la stratigraphie du milieu de dépôt (Lawrence & Goodman, 1997).

7.3.2 Prospection électrique

La propriété physique utilisée est la résistivité électrique, caractérisant la difficulté d'un courant électrique à traverser un matériau. La large gamme de variations permet une description du milieu entourant les structures proprement dites. Les matériaux conducteurs sont les particules d'argile à la surface desquelles les cations peuvent se déplacer, et l'eau présente dans les pores contient toujours une certaine quantité de sel dissous (Scollar *et al.*, 1990).

La mesure est réalisée à partir d'un quadripôle constitué de quatre électrodes, quatre pointes métalliques, dont deux servent à injecter un courant dans le sol et les deux autres à mesurer la différence de potentiel résultant de cette injection. L'écartement entre les pôles gouverne la profondeur d'investigation. On peut ainsi prospecter le sous-sol dans les trois dimensions : la verticale en modifiant l'écartement des pôles ; et les deux directions horizontales en déplaçant latéralement le quadripôle.

Chapitre 3

Origine des dépressions fermées du Plateau lorrain, les mardelles

Une partie des données disponibles dans ce chapitre ont fait l'objet d'une publication dans la revue *Geomorphology* :

> **David Etienne**, Pascale Ruffaldi, Stéphanie Goepp, Frédéric Ritz, Murielle Georges-Leroy, Benoit Pollier and Etienne Dambrine, 2011. The origin of closed depressions in Northeastern France : A new assessment. *Geomorphology* **126**, 121-131.



Document de couverture du chapitre

Photographie de la tranchée réalisée dans la mardelle de Langatte (LAN) lors des fouilles archéologiques (INRAP, Metz) le long du futur tracé LGV Est. Cliché de Stéphanie Goepp.

1. Introduction

Les premières études sur les mardelles en Lorraine datent du début du 19ème siècle (St. Ferjeux, 1847 ; Maud'Heux, 1861) et pose déjà la question de leur origine. Au cours du 20ème siècle, cette question est très étudiée, par Wichmann (1903), Colbus (1905), Welter (1923) et Grenier (1906). Leurs travaux d'inventaires de ces dépressions en contexte forestier et agricole et d'excavations de nombreuses mardelles leurs permettent de préciser leurs distributions et leurs morphologies afin de définir une stratigraphie type des sédiments les remplissant. La fouille de certaines d'entre-elles mettent au jour des bois travaillés. Ces auteurs interprètent leurs résultats en tant qu'anciennes habitations gauloises (Wichmann, 1903 ; Grenier, 1906 ; Welter, 1923 ; Linckenheld, 1927) (Annexe 1). D'autres origines sont proposées telles que des exploitations de matériaux ou des citernes (Härbele, 1938). A cette époque, les géologues s'accordent tous, après de longues discussions, sur le fait que ces mares « *ne peuvent être que l'oeuvre de l'industrie humaine* » (Schumacher &Van Werveke, 1908).

Après les années 1920, les archéologues délaissent ces mardelles qui intéressent alors des naturalistes et géologues. Deffontaines & Guyot (1922) puis Delafosse *et al.* (1932) proposent une théorie géologique de formation par dissolution de lentilles de gypse, de carbonates ou de sel gemme inclues dans les socles géologiques (marnes du Keuper et calcaire du Muschelkalk). Ces dépressions serient donc « *un aspect du karst vacuolaire et le résultat de l'action des eaux souterraines* » (Delafosse, 1948). A partir de cette date, la question de leur origine parait tranchée et la fréquence des études sur les mardelles diminue (Colin & Godard, 1962). A l'appui de cette thèse, on trouve de nombreux témoignages de paysans constatant des effondrements de terrain brutaux dans leurs prairies (Annexe 2).

Les travaux suivants s'attacheront à comparer les mardelles à d'autres phénomènes géomorphologiques de surface tels que les *pingos* des Hautes-Fagnes et éliminent une possible formation des mardelles par des phénomènes périglaciaires (Slotboom, 1963 ; Pissart, 1956, 2003). Par la suite, Coûteaux (1969) propose une origine géologique par dissolution lente des carbonates de surface suivie d'un siphonnage des sédiments par un système karstique sous jacent. Wingert (1996) propose une origine anthropique pour l'exploitation de nodules de fer en Lorraine. Tandis que les travaux de Barth (*et al.*, 2001) envisagent une origine polygénique (anthropique et naturelle).

Toutefois, il faudra attendre les années 2000 pour que des études scientifiques intégrées sur la question de leur origine soient réalisées. Ainsi des recherches en France et en Belgique relancent la question par l'étude palynologique des sédiments (Ruffaldi *et al.*, 2007) et des études géomorphologiques (Gillijns *et al.*, 2005 ; Vanwalleghem *et al.*, 2006b).

Ce chapitre se propose d'étudier les différentes théories de formation en réalisant une étude complète de l'objet géomorphologique « mardelle » en utilisant des méthodes paléo-environnementales afin de dater leur formation (datations radiocarbone AMS), de reconstituer l'environnement de leur création (palynologie) ainsi que leur géomorphologie et leur implantation dans le socle géologique (Fouilles LGV, sondages géotechniques et imageries géophysiques). Cette question a fait l'objet d'un article publié dans *Geomorphology* (Etienne *et al.*, 2011). Les résultats de cet article sont ici résumés en français et enrichis de données n'ayant pu être inclues et d'informations complémentaires obtenues lors de la campagne de fouilles archéologiques de Juin-Juillet 2010 (Gazenbeek, en cours ; Klagg, en cours).

2. Résultats et interprétations

2.1 Contexte géologique

En comparant la carte d'inventaire des mardelles en Moselle dressée par Wichman (1903) (Annexe 3) avec la carte géologique (Fig. 3.1), Delafosse (1948) note une plus grande proportion

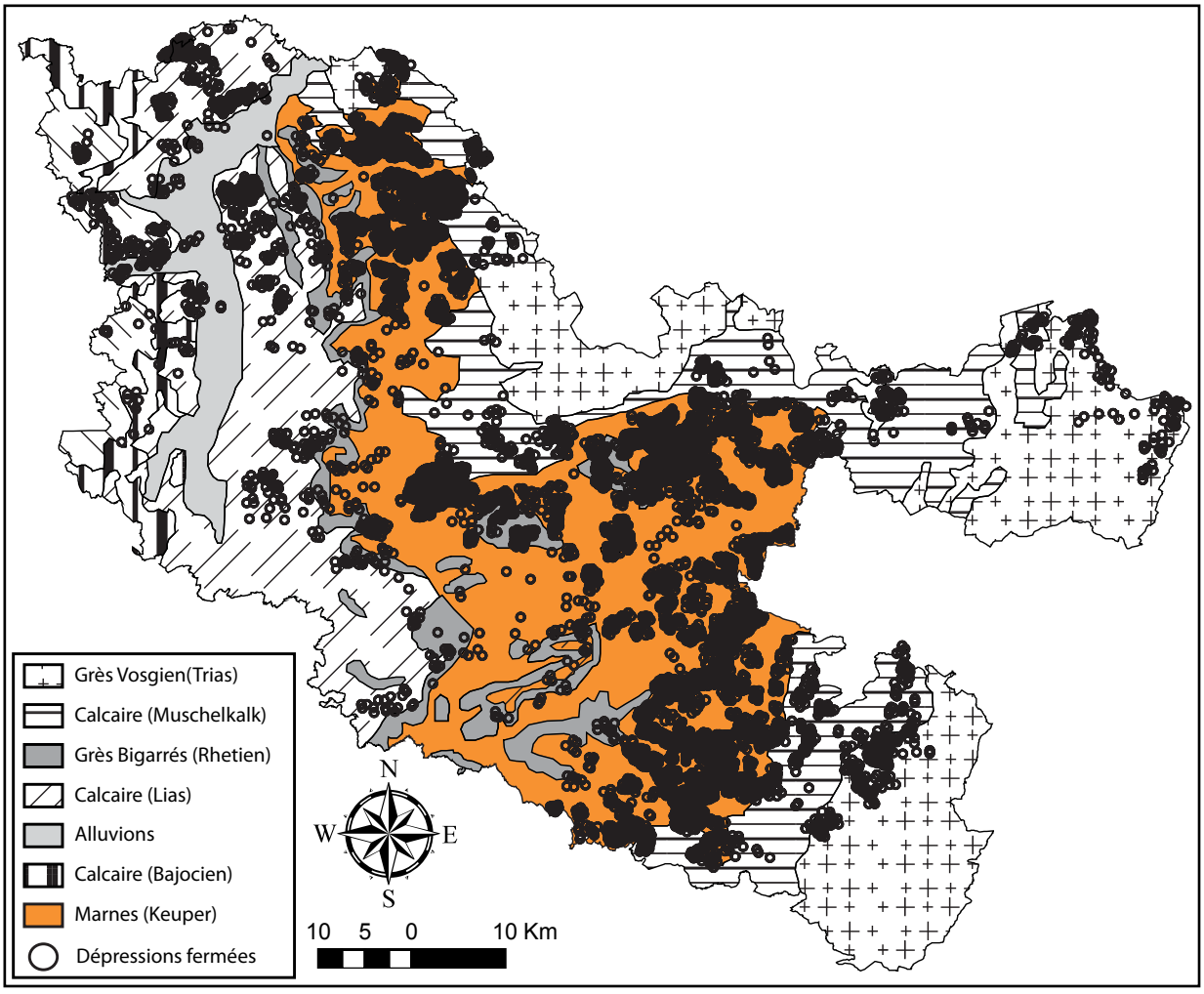


Figure 3.1 - Carte illustrant le croisement entre la carte géologique du département de la Moselle (BRGM, 2001) et la carte d'inventaire des mardelles dressée par Wichmann en 1903 (Annexe 3).

de structures sur les terrains marneux du Keuper et sur les calcaires du Muschelkalk. Certaines zones géographiques sont considérées « vides » de mardelle, les régions gréseuses très majoritairement.

Dans une bande de 15 km² sur les terrains argilo-marneux du Keuper inférieur (Fig. 3.2), des études géotechniques préalables à la construction de la future ligne LGV recherchèrent la présence éventuelle de matériaux géologiques solubles (gypse, sel gemme) ou de vide. Ainsi, les 39 sondages géotechniques réalisés, révèlent une puissance d'au moins 20 mètres en profondeur de marne bariolées aux couleurs variant du bleu-vert au noir-rougeâtre. Seuls quelques cristaux dispersés de gypse ($CaSO^4$) sont découverts dans 3 des 39 sondages et aucun vide dans le socle géologique n'est signalé (RFF, 2008).

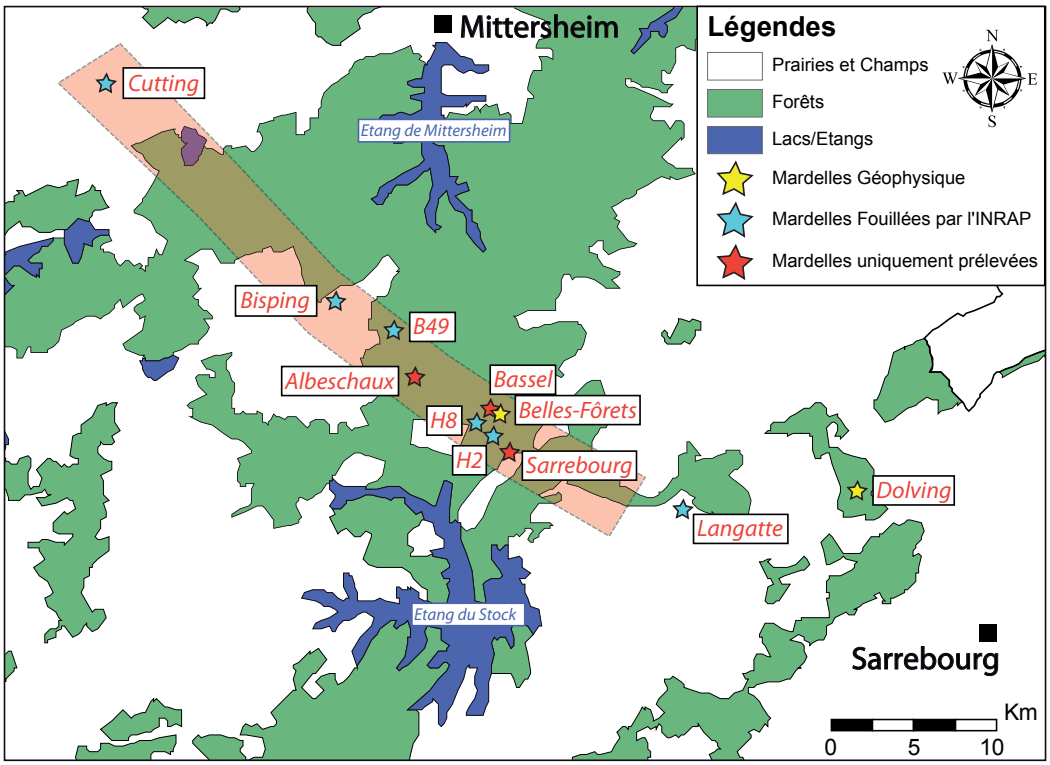


Figure 3.2 - Carte de localisation des sondages géotechniques (bande rouge) englobant plusieurs mardelles étudiées dans ce manuscrit et les sites des fouilles archéologiques de 2009 et de 2010.

Dans cette même zone, l'utilisation du Modèle Numérique de Terrain (MNT) fournit par les prospections LiDAR LGV permet d'identifier 260 structures que ce soit en contexte forestier ou agricole (prairies ou cultures actuelles) (Fig. 3.3) dont les mardelles d'Albeschaux (ALB), Belles-Forêts (BEL), Bisping (BIS), Bassel (BAS) et Sarrebourg (SAR) que nous avons étudiés ainsi que celle de Cutting (CUT) (M. Gazenbeek, en cours) et 7 autres mardelles (T. Klag, en cours) fouillées par l'INRAP en 2010.

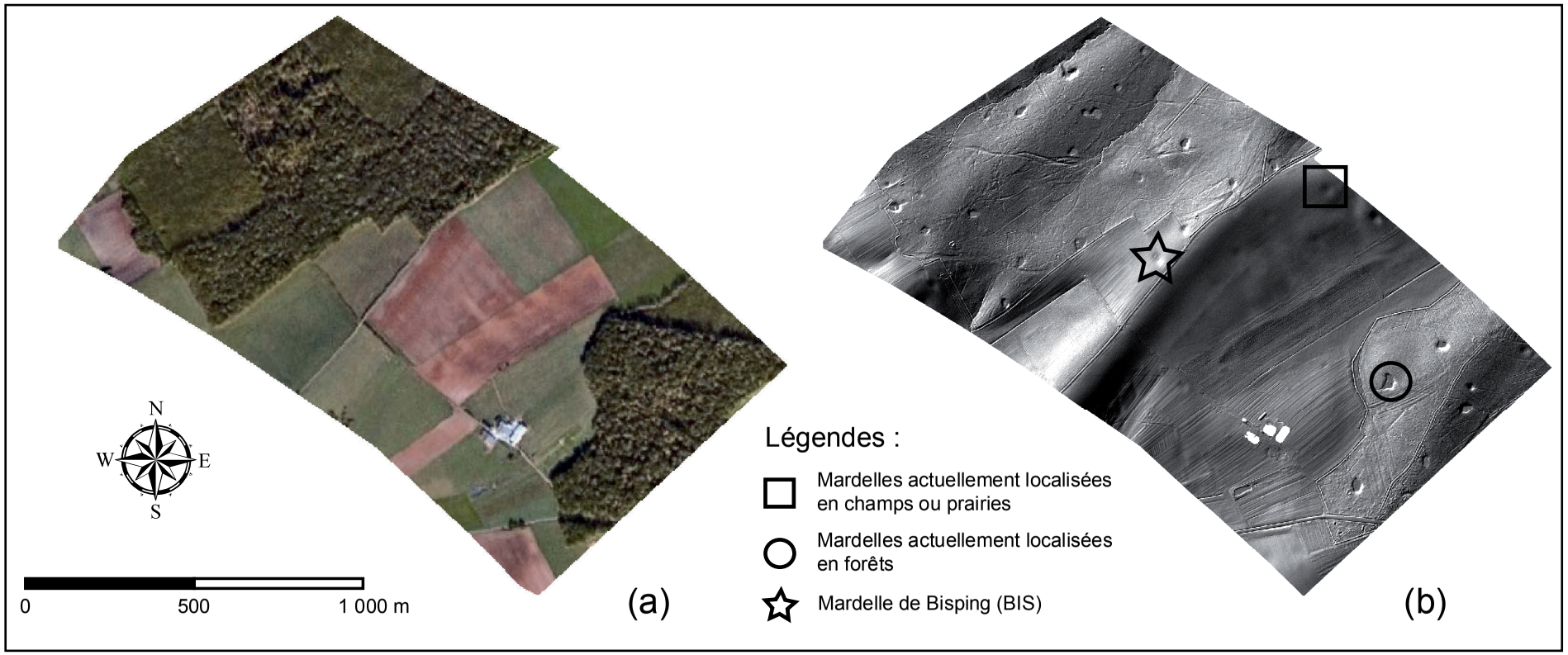


Figure 3.3 - Image satellite (a) et de la prospection LiDAR (b) (ombrage 315°, élévation 45°) sur la même fenêtre géographique. Les symboles signalent des exemples de mardelles actuellement en forêt (cercle), en champs (carré) ou en prairie (étoile). La mardelle identifiée par une étoile correspond à la mardelle de Bisping étudiée dans la suite de ce manuscrit.

2.2 Morphologies

2.2.1 Sondages manuels

La morphologie des remplissages est difficile à étudier dans les structures en eau sans la mise en place de moyens techniques lourds. Dès lors, la première méthode consista en un sondage à l'aide d'une perche de structures tourbeuses le long d'un transect avec une mesure tous les mètres jusqu'au contact avec le socle géologique. Les structures étudiées par cette méthode (Assenoncourt, Römersberg, Sarrebourg et St. Jean) présentent une morphologie identique, en forme de « baignoire ». Les parties amont et aval sont pentues (50 à 60%) et rejoignent un fond « plat » (Fig. 3.4). Le niveau d'eau est parfois régulé par un exutoire artificiel (non daté) creusé au niveau du sol forestier.

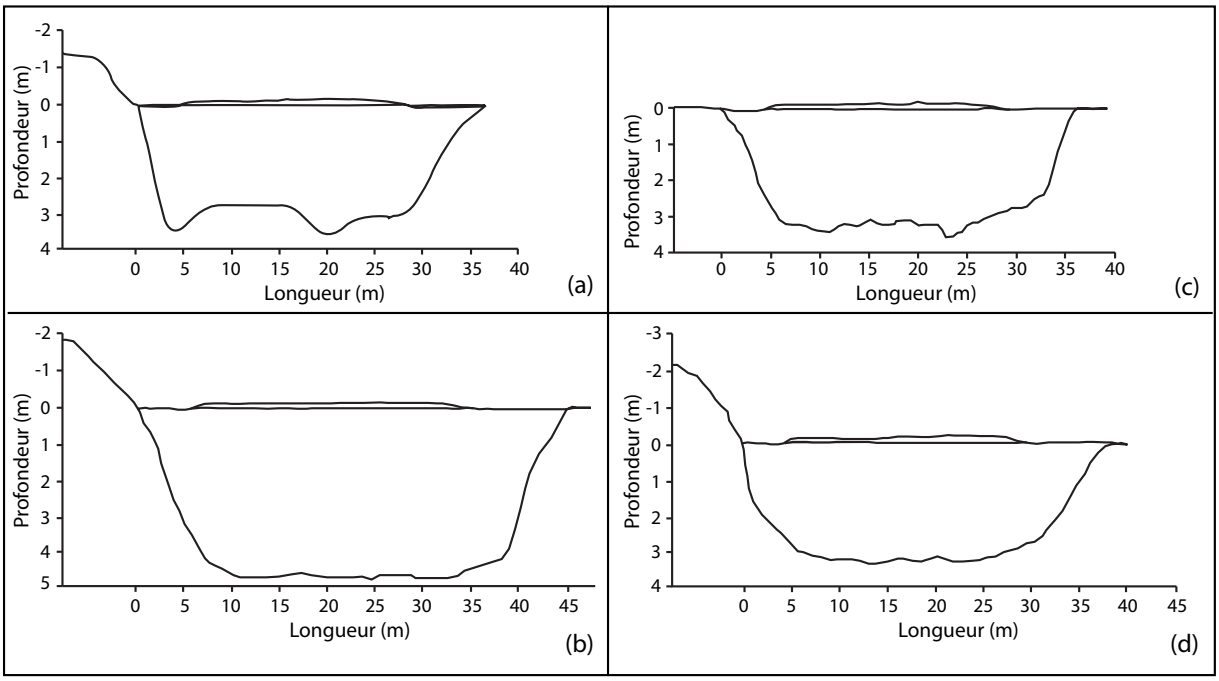


Figure 3.4 - Schémas des profils morphologiques des mardelles tourbeuses d'Assenoncourt (a) (Ruffaldi *et al.*, 2007), du Römersberg (b), de Sarrebourg (c) et de St. Jean (d) relevés à l'aide d'un sonde manuelle.

2.2.2 Fouilles « archéologiques »

La première campagne de fouille réalisée par l'INRAP en 2009, a fait l'objet d'un rapport de fouille (Goepp, 2010) décrivant la morphologie et l'implantation des structures comblées de Bisping (Fig. 3.5 ; Annexe 4 et Annexe 5), de Langatte (Annexe 6 et Annexe 7) et de Haut-Clocher (Annexe 8 et Annexe 9). Leurs fouilles et leurs descriptions morphologiques confirment une forme en « baignoire », des rebords aval et amont pentus et un fond « plat ».

Elles décrivent également le contexte géologique dans lequel les mardelles s'imbriquent. Aucun siphon karstique sous la structure ou effets d'un effondrement karstique (plissement des

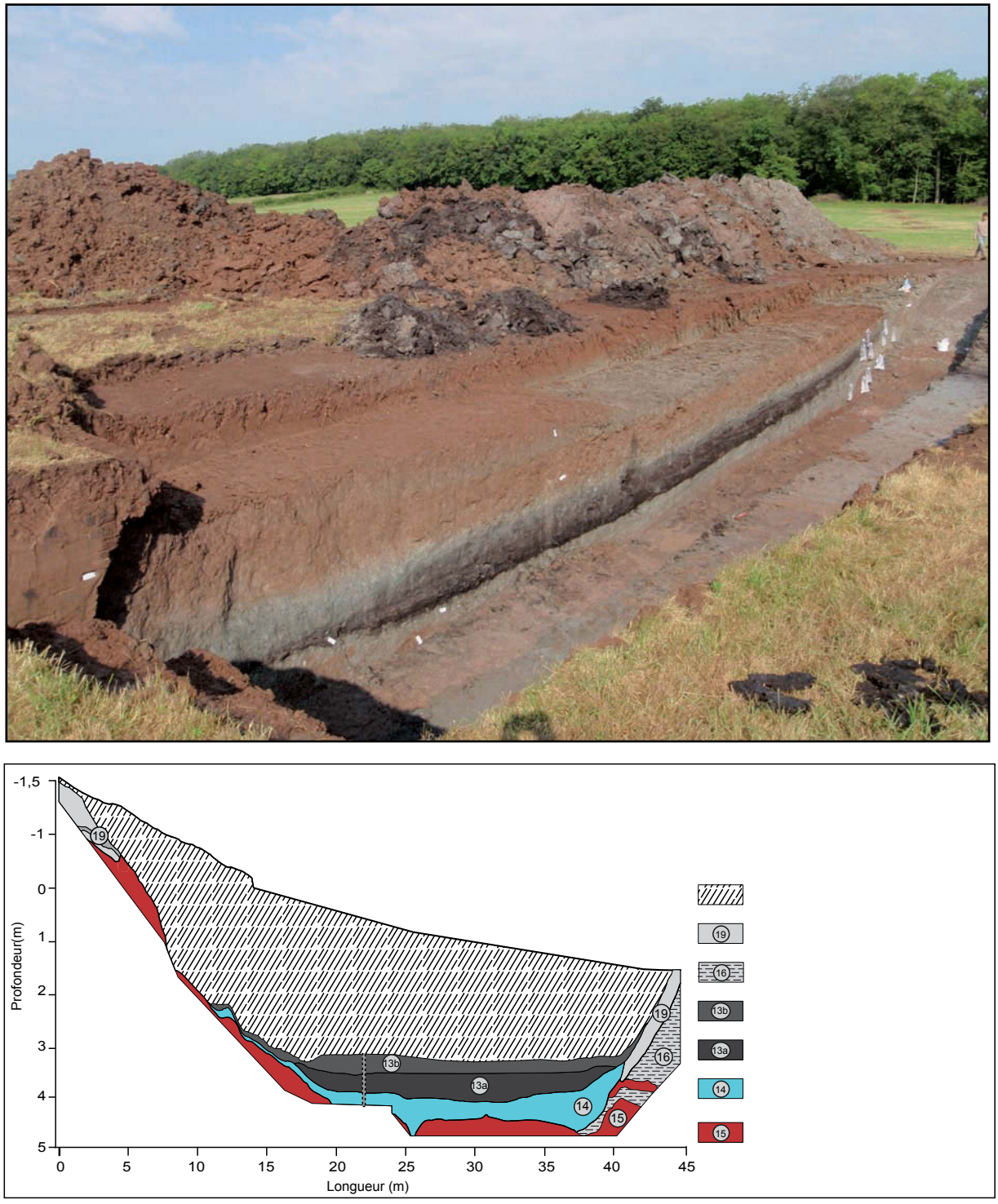


Figure 3.5 - Photographie et schéma de la coupe de la mardelle de Bisping (BIS) réalisée lors des fouilles archéologiques de l'INRAP en 2009 et des Unités Stratigraphiques (US) identifiées sur le terrain avec Stéphanie Goepp et Etienne Dambrine.

couches sur les bords) ne fut noté. Au contraire, les couches géologiques formant l'encaissant et le fond de la structure se sont révélées suivre le pendage naturel de la pente. Les couches coupées par la mardelle sont des successions de marnes irisées rouges et grises, facilitant, par l'inclusion naturelle de liseret colorés, une meilleure visibilité des concordances horizontales des

couches géologiques. Aucun bourrelet de terre, pouvant correspondre aux déblais de creusement n'a été révélé par ces fouilles conformément à toutes les études précédentes.Les résultats des fouilles de 2010 réalisées par l'INRAP (P. Klag) sur des structures actives sont illustrés par des photographies de la mardelle H2 (Annexe 10). Ces fouilles fournissent de nouvelles descriptions géomorphologiques identiques à celles qui ont été relevées en 2009 et révèlent la présence de « marche d'escalier » à « angle droit » sur les bords amont et aval des structures, phénomènes déjà observés en 2009 à Langatte (Fig. 3.6).

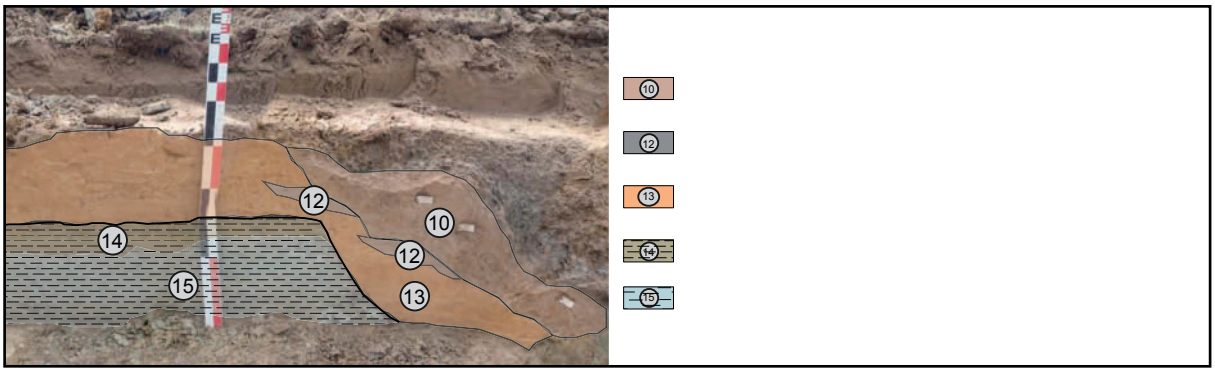


Figure 3.6 - Zoom sur le rebord aval de la mardelle de Langatte (LAN) illustrant les coupes nettes et en « marche d'escalier » que l'on retrouve sur les bords amont et aval de la plupart des mardelles fouillées.

La mardelle comblée de Cutting (CUT) (Annexe 11) fouillée par M. Gazenbeek regroupe l'ensemble des caractéristiques géomorphologiques identifiées sur les autres sites.

2.2.3 Prospections géophysiques

Ces fouilles étant tout de même des travaux lourds phsiquement et financièrement, des méthodes non destructives sont testées pour décrire leur morphologie, leur remplissage et leur implantation dans le socle géologique. Deux méthodes de prospections géophysiques sont utilisées, la prospection électrique et la prospection radar (*cf. Chapitre 2*).

2.2.3.1. Prospection électrique

La prospection électrique est testée sur la petite structure de Belles-Forêts (BEL) (*cf. Fig. 3.2*) implantée sur les marnes du Keuper inférieur et inclues dans la bande LiDAR LGV et la zone des sondages géotechniques.

Le modèle présenté (Fig. 3.7) est issu de la 4ème itération des données brutes, le panneau éléctrique étant composé en réalité de 36 électrodes espacées d'un mètre en configuration dipôle-dipôle. Nous avons privilégié la reconstitution des structures horizontales en effectuant une inversion robuste afin de minimiser les contrastes entre la surface et le remplissage de la structure.

L'objet mardelle apparaît être plus conducteur (23 Ωm) que le socle géologique encaissant (30

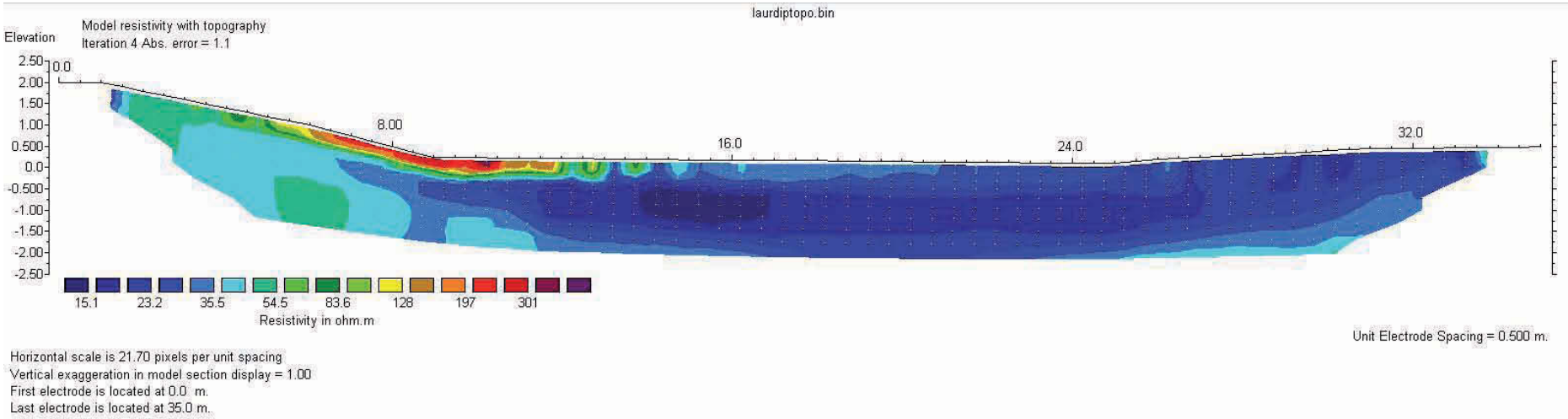


Figure 3.7 - Image obtenue après la quatrième itération de la prospection au panneau éléctrique de la mardelle de Belles-Forêts (C. Laplaige et C. Camerlynck). Les valeurs de conductivités sont plus élevées dans la marne (E) plutôt que dans les sédiments de remplissage de la mardelle (A). Les rebords amonts et avals sont identifiés (P1, P2) mais la profondeur de prospection n'est pas suffisante pour délimiter et décrire le contact entre la sédimentation et le socle géologique constitué par des marnes irisées du Keuper inférieur.

Ωm), ceci étant lié à la différence d'humidité contenue dans le matériau sédimentaire (argile, matière organique) et la marne. Cette méthode permet de délimiter les bordures horizontales de la mardelles, de P1 à P2 pour une longueur d'environ 24 m, mais la profondeur de prospection n'est pas suffisante pour en délimiter de façon sûre et continue le fond. Toutefois, on peut observer, entre E1 et P1, la transition entre le socle géologique et le remplissage sédimentaire puis la remontée du socle géologique en P2 avant d'atteindre le sol en E2.

2.2.3.2. Prospection radar sol

La prospection radar sol est testée sur la mardelle de Dolving (DOL) (*cf. Fig. 3.2*) implantée sur les calcaires du Muschelkalk.

La prospection radar a été effectuée à la fréquence de 225 Mhz, à partir de profils transversaux espacés de 1 m et couvrant les trois-quarts de la dépression préalablement déblayée des nombreux bois qui l'encombraient. La figue 3.8 représente les sections radar enregistrées tous les mètres pairs de la prospection ainsi qu'un profil test réalisé perpendiculairement à l'axe des profils transversaux (Fig. 3.8).

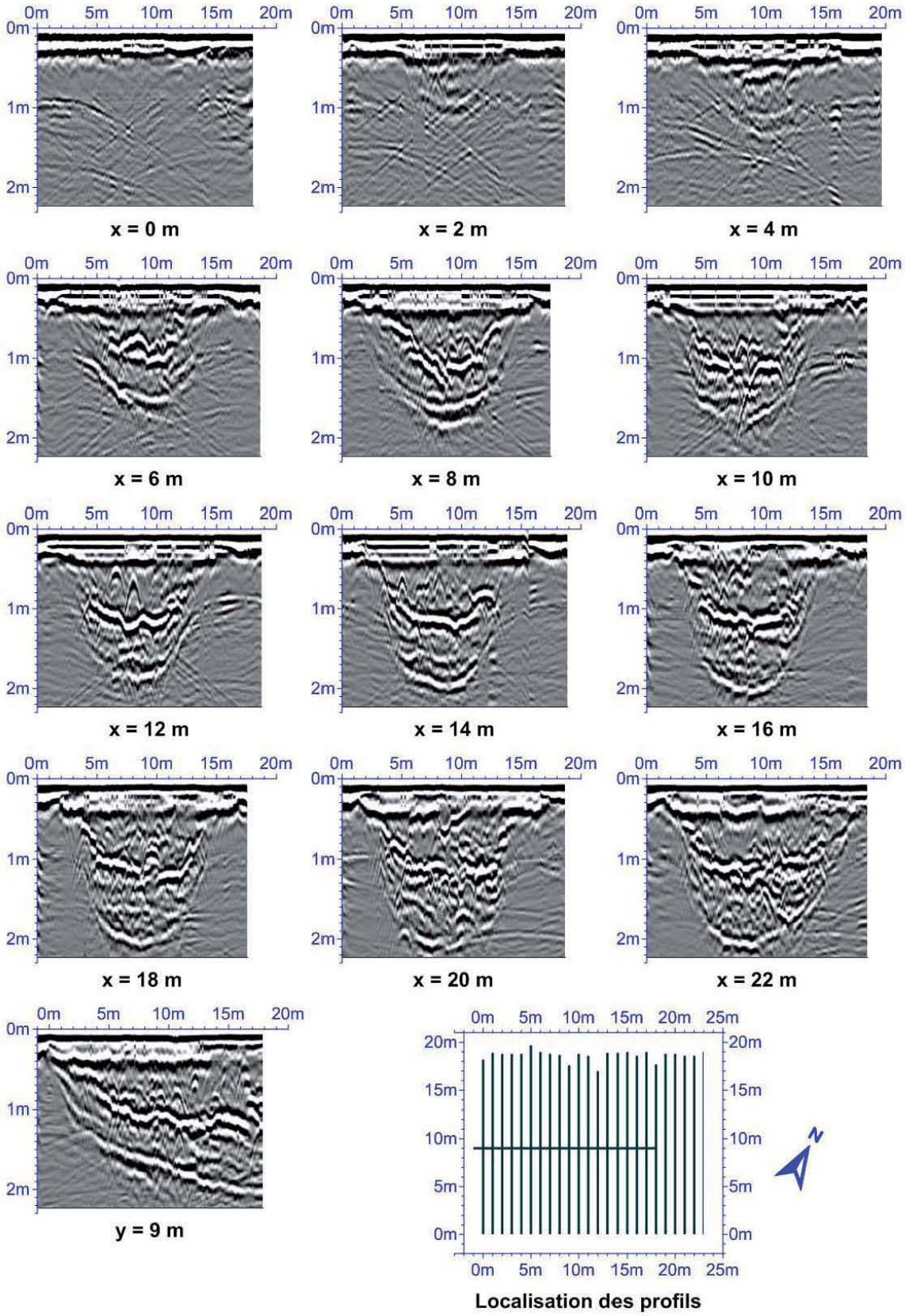
La correction topographique des profils n'a pas été encore effectuée mais l'on peut tout de même et sans aucune difficulté identifier distinctement 3 réflecteurs dans la géométrie du remplissage de la mardelle. Le moins profond correspond à l'interface eau / sédiment. Les deux autres réflecteurs, situés respectivement à 1 m et entre 1,5 et 2 m de profondeur, pourraient matérialiser des changements de faciès dans la stratigraphie du remplissage : le réflecteur à 1 mètre marquant la transition entre les sédiments organiques et les sédiments argilo-organiques et le réflecteur à 2 m, marquant la transition entre la base du remplissage et le sommet du substratum calcaire.

Ces interprétations devraient être prochainement validées par la réalisation de sondages mécaniques. La restitution 3D de la stratigraphie du milieu de dépôt (Fig. 3.9) devrait permettre de quantifier très précisément le stock de minéral déposé dans la mardelle et de le retranscrire par la suite en une quantité de sol végétal érodé sur son bassin versant en fonction du temps.

2.3 Sédimentation

De 1847 à 1905, environ 5000 structures furent inventoriées et 150 à 200 fouilles de mardelles furent réalisées en Lorraine et en Alsace principalement par Colbus, Wichmann, Welter et Grenier. Leurs résultats de fouilles révèlent une grande concordance de leur sédimentation et définit la stratigraphie des remplissages que l'on peut y retrouver. Les textes décrivent des unités stratigraphiques identiques formées dans une logique de dépôt par :

- « un sédiment argileux couvrant le sol naturel » à la base
- « une tourbe formée par une accumulation de feuilles et de menus branchages », « au



Sections radar enregistrées tous les mètres pairs de la prospection (x=0m à x=9m) ainsi qu'un profil test (y=9 m) réalisé perpendiculairement à l'axe des profils transversaux. Données fournies par C. Camerlynck et

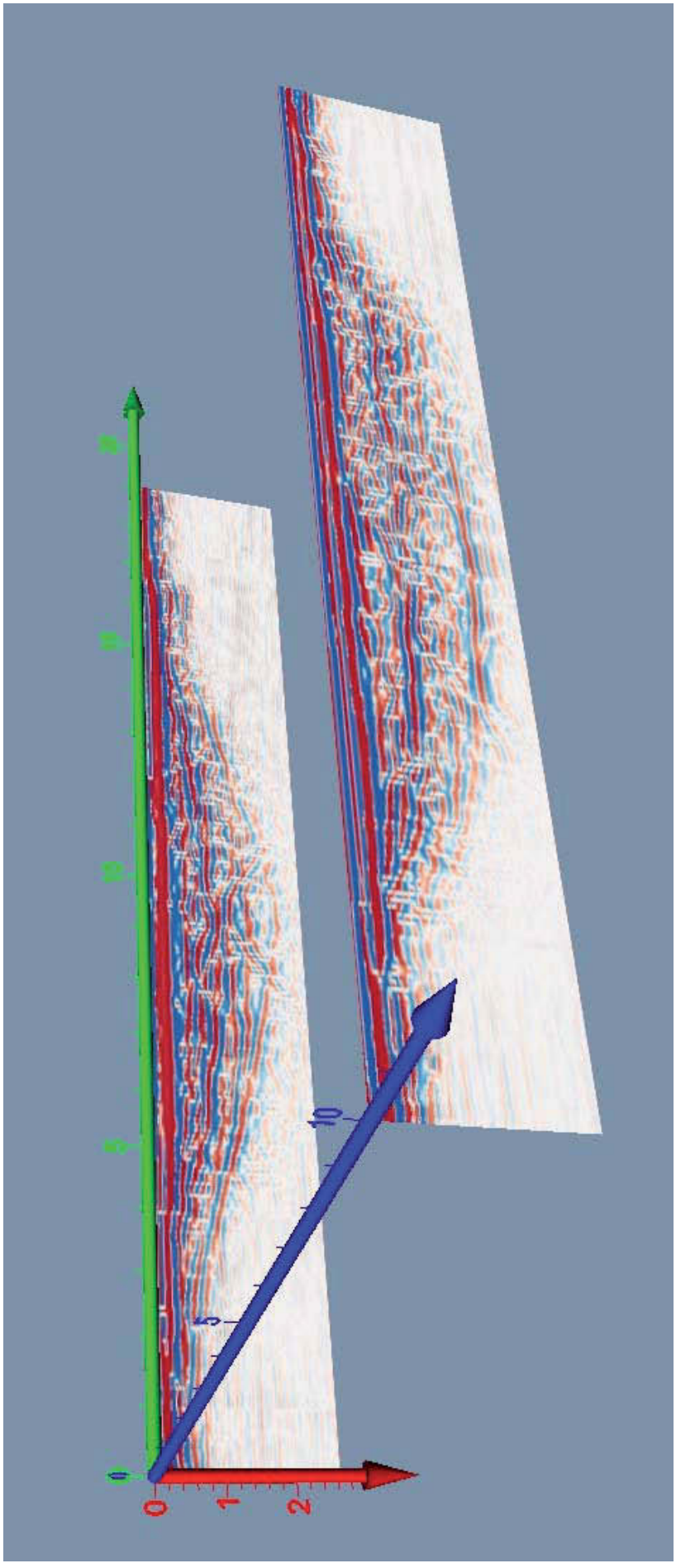


Figure 3.9 - Images de la représentation 3D des remplissages sédimentaires de la mardelle (couleur bleu et rouge) et matérialisation de l'encaissant formé par les calciare du Muschelkalk (en blanc). Données fournies par C. Camerlynck et G. Bossuet.

milieu de cette couche et entre-elle et la précédente » on retrouve assez fréquemment (107 sur les 150 à 200 fouillées) (Grenier, 1906) « des troncs d'arbres dont le nombre et les dimensions varient ». Ces troncs sont travaillés dans certains cas mais la plupart sont non équarris et possèdent encore des branches

- « une ou deux couches d'argiles de couleurs ou de finesses différentes »

- le sol dans les mardelles sèches ou « directement sous l'eau, une couche de vase ou d'humus constitué par des feuilles mortes » pour celles encore en eau.

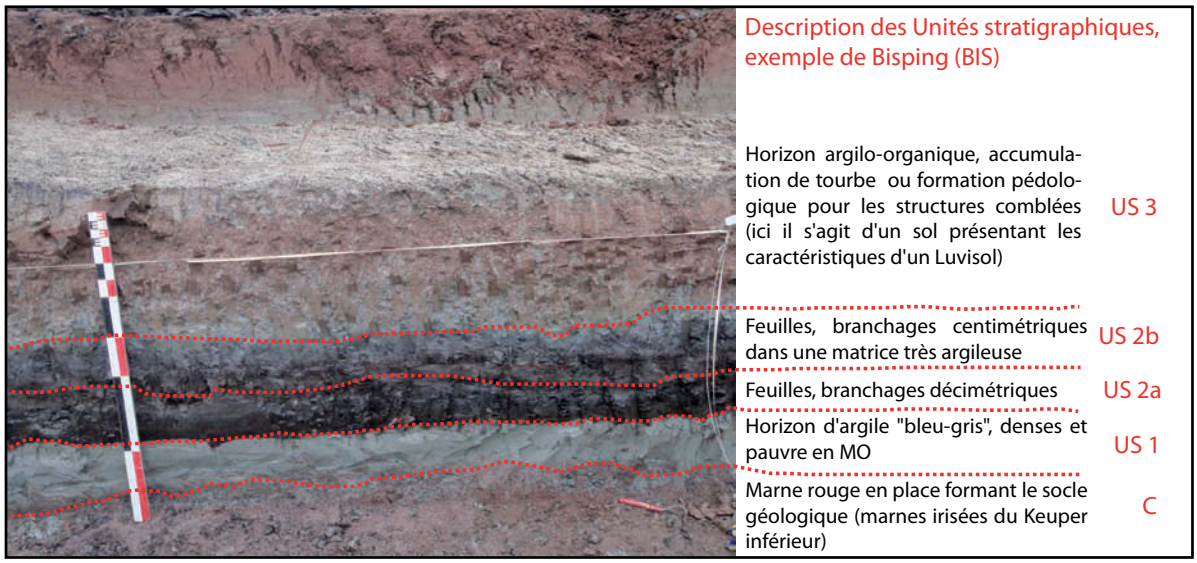


Figure 3.10 - Photographie de la sédimentation de la mardelle de Bisping illustrant les trois grandes Unités Stratigraphiques (US) retrouvées sur les mardelles prélevées et fouillées lors de ce travail de thèse mais également dans celles présentées dans la littérature du début du siècle.

L'ensemble des structures fouillées ou prélevées révèlent une stratigraphie pouvant être décomposée selon ces trois Unités Sédimentaires (US) majeures (*cf. Fig. 3.5 ; cf. Annexes 4-9*). Ainsi l'ensemble des données engrangées sur les séquences étudiées peuvent être synthétisées en une stratigraphie commune formée dans une logique de dépôt par :

- un horizon bleu/gris (US1) en contact direct avec les marnes du socle géologique, très pauvre en matière organique (< 10%), dense (0,6 < DS (g/cm^3) < 1,2), et principalement composé par des argiles (600 g/kg) et des limons fins (200 g/kg)

- un horizon (US2b) très organique (MO~40% et DS (g/cm^3) à ~0,1) avec une accumulation de feuilles et de branchages de diamètres centimétriques dans une matrice uniquement argileuse (900 g/kg). Ces deux unités stratigraphiques (US1 et US2b) peuvent être séparées par une accumulation de bois de diamètre décimétrique (US2a)

- enfin selon les cas, nous pourrons avoir soit une sédimentation argilo-organique, une accumulation de tourbe (MO~90% et DS (g/cm^3) à ~0,05) ou même des formations pédologiques dans les structures aujourd'hui comblées et asséchées (US3).

Nom du site	Massif forestier	Commune (département)	Localisation (N°/E°)	Métode de datation	Datations (en BP)	Ages calibrés à 2σ (cal. BP)	Périodes culturelles	Références bibliographiques
Albeschaux (ALB)	(D) de Fénétrange	Belle-Forêts (57)	48°47'54.38"N / 6°55'39.72"E	C^{14} AMS	1510 ± 30BP	[1319 ; 1515]	Romaine/Haut Moyen-âge	Etienne , 2011
Assenoncourt (ASS)	(D) d'Assenoncourt	Assenoncourt (57)	48°45'31.51"N / 6°46'38.04"E	C^{14} AMS	1490 ± 30BP	[1306 ; 1482]	Romaine/Haut Moyen-âge	Etienne , 2011
Bassel (BAS)	(D) de Fénétrange	Belle-Forêts (57)	48°47'23.75"N / 6°56'35.83"E	C^{14} AMS	1405 ± 35BP	[1280 ; 1369]	Haut Moyen-âge	Etienne , 2011
Bisping (BIS)	-	Belle-Forêts (57)	48°48'49.63"N / 6°54'12.62"E	C^{14} AMS	1810 ± 30BP	[1626 ;1 820]	Romaine	Etienne , 2011
H2	(D) de Fénétrange	Belle-Forêts (57)	48°47'22.56"N / 6°56'32.39"E	C^{14} AMS	1860 ± 70BP	[1613 ; 1949]	Romaine	Etienne, ce document
Honskirch (HON)	(D) d'Albestroff	Honskirch (57)	48°56'18.16"N / 6°55'37.46"E	C^{14} AMS	1530 ± 30BP	[1350 ; 1518]	Romaine/Haut Moyen-âge	Etienne , 2011
Langatte (LAN)	-	Langatte (57)	48°46'20.20"N / 6°58'33.49"E	C^{14} AMS	2190 ± 60BP	[2043 ; 2339]	Age du Fer	Etienne, ce document
Rambervillers (RAM)	(C) de Rambervillers	Rambervillers (88)	?	C^{14} AMS	?	[1951 ; 2306]	Age du Fer	Etienne , 2011
Römersberg (RÖM)	(D) du Römersberg	Guermange (57)	48°48'27.12"N / 6°46'52.10"E	C^{14} AMS	2120 ± 50BP	[1878 ; 2000]	Age du Fer/Romaine	Etienne , 2011
Saint Jean (STJ)	(D) de Saint Jean	Dieuze (57)	48°47'2.25"N / 6°44'8.83"E	C^{14} AMS	1995 ± 30BP	[1994 ; 2144]	Age du Fer	Etienne , 2011
Sarrebourg (SAR)	(D) de Sarrebourg	Belle-Forêts (57)	48°46'58.96"N / 6°57'5.67"E	AMS	2095 ± 30BP			
Altrip	-	Altrippe (57)	-	Poterie	-	-	Romaine	Wichmann in Grenier (1906)
Leyweiler	-	Leyviller (57)	-	Tessons et cruche	-	-	Romaine	Wichmann in Grenier (1906)
Les Bachats	-	Rhodes (57)	-	Trulla en bronze	-	-	Romaine	in Grenier (1906)
Gondrexange I	(C) de Réchicourt	Gondrexange (57)	-	Poterie	-	-	Romaine	in Grenier (1906)
Gondrexange II	(C) de Réchicourt	Gondrexange (57)	-	Poterie	-	-	Romaine	in Grenier (1906)
Drulling	NC	Durlingen (67)	-	Poterie sigillée	-	-	Romaine	Welter in Grenier (1906)
Knutange		Knutange (57)	-	Poterie/Pollen	-	-	Romaine/Subatlantique	Richard dans Blouet & Klag, 1987
Cutting (CUT)	-	Angvillers-les-Bisping (57)	48°50'19.41"N / 6°50'23.81"E	Poterie	-	-	Age du Fer	INRAP, 2011
Grandes Friches	-	Tragny (57)	-	Poterie/Planche	1780 ± 10BP	[1625 ; 1739]	Romaine	T. Klag, 2009
Kwade Putten	-	Leuven (Belgique)	-	C^{14} AMS	1500 ± 45BP	[1306 ; 1517]	Romaine/Haut Moyen-âge	Gillijns , 2005
Merdaal Forest	Merdaal Forest	Leuven (Belgique)	-	OSL	-	[1600 ; 1860]	Romaine	Vanwalleghem 2007

Tableau 3.1 - Tableau de synthèse regroupant l'ensemble des datations directes ou indirectes de mardelles localisées en Lorraine et en Belgique précisant le nom et la localisation du site, le contexte géologique, la méthode de datation, la nature du macro-reste daté, les résultats de la datations AMS, la calibration de cette date à l'aide du logiciel Calib 6.0.2 à 2 sigma selon la courbe de calibration Intcal09 (Reimer *et al.*, 2009) ainsi que la source bibliographique.

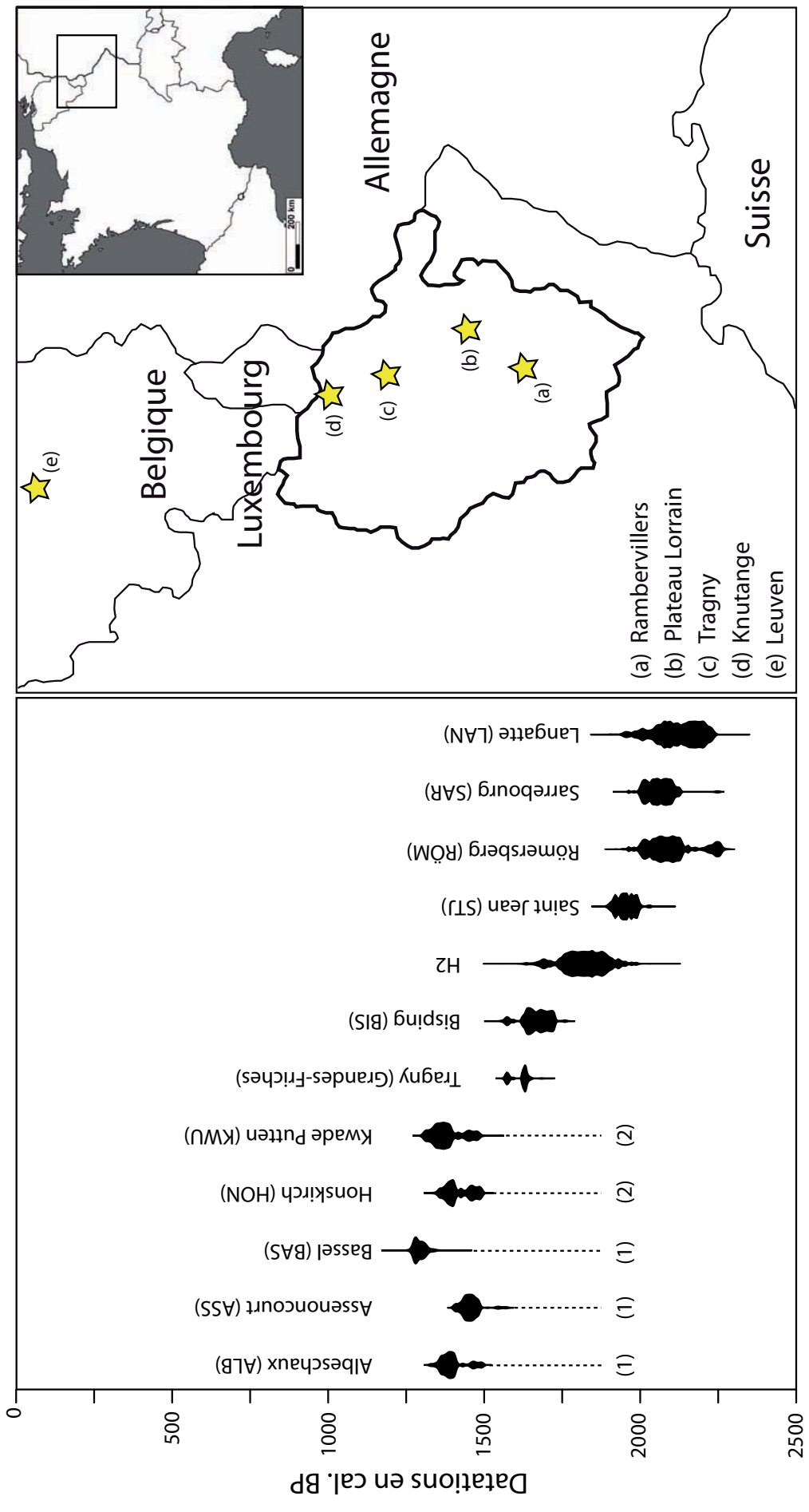


Figure 3.11 - Calibrations (a) et carte de localisation (b) des datations radiocarbone des fonds sédimentaires des mardelles en Lorraine à Rambervillers (a), des mardelles de Saint Jean, Sarrebourg, Langatte, Bisping Römersberg, Bassel, Assenoncourt et Albeschaux (b), de Tragny (c), de Knutange (d) et de Leuven en Belgique (e). Pour certaines d'entre-elles, (1) l'unité stratigraphie US1 ou le socle géologique n'ont pas été atteints ou (2) la datation radiocarbone n'est pas placée à la base de la sédimentation mais 24 cm au dessus à Honskirch (Hon) et plusieurs dizaines de centimètres à Kwade Putten (KWU).

La concordance entre nos résultats stratigraphiques et les horizons décrits dans la littérature du début du siècle suggère une dynamique de sédimentation très proche pour toutes les mardelles.

2.4 La datation des fonds sédimentaires

La datation de la création de ces structures a posé question dès les premières fouilles archéologiques. La seule méthode possible au début du 20ème siècle était évidemment liée aux artefacts archéologiques (tuiles, tessons, outils…) pouvant être découverts lors des fouilles en position basale de la stratigraphie (US1) et donc en contact direct avec le socle géologique.
Lors de ces fouilles, les découvertes d'artefacts ne furent pas systématiques mais Wichmann (1903) ou Welter (1923) découvrirent des débris de poteries alors datés de l'Hallstatt (2700 à 2400 cal. BP) et de La Tène (2400 à 2000 cal. BP), des fragments de tuiles romaines et de céramiques sigillées. Des fouilles plus récentes réalisées par l'INRAP ont également mises au jour des fragments de poterie romaine dans la mardelle de Knutange/Boulange dans le nord du département de la Moselle (Blouet & Klag, 1987). Toutefois il faudra attendre le développement des méthodes de datation relative (C^{14}, OSL) et les études multidisciplinaires récentes (Gillijns *et al.*, 2005 ; Vanwalleghem *et al.*, 2006b) avant de proposer de nouvelles datations.

Afin de dater leur formation, il est essentiel de dater les débuts de la sédimentation en isolant des macro-restes (graines, feuilles, ou des charbons dans le pire des cas) dans l'échantillon sédimentaire (US1) en contact direct avec le substrat géologique. Il est plus aisé dans le cadre de fouilles archéologiques de s'assurer le prélèvement de l'horizon sédimentaire le plus profond et donc le plus ancien. Mais pour celles qui n'ont pas été fouillées, de nombreux sondages et carottages assurent un prélèvement optimal. Malgré cela, certaines structures à la sédimentation argileuse compacte (Albeschaux, Assenoncourt et Bassel) l'utilisation d'un carottier manuel (type GIK) n'a pas permis le prélèvement de l'échantillon basal de la séquence.
Un tableau de synthèse (Tab. 3.1) regroupe toutes les datations directes ou indirectes des fonds sédimentaires disponibles pour les sites étudiés en Lorraine et en Belgique en précisant, le nom et la localisation du site, le contexte géologique, la méthode de datation et les résultats de la datation AMS (en BP). La localisation géographique et les calibrations (en cal. BP) de toutes ces datations radiocarbone sont comparées dans une figure de synthèse (Fig. 3.11).
L'incertitude inhérente aux datations radiocarbone AMS et la probabilité de vieillissement de celles réalisées à partir de macro-restes carbonisés (Kennett *et al.*, 2002) sont évidemment à considérer. Toutefois il est frappant de noter l'appartenance de l'ensemble de ces datations à la période chrono-écologique récente du Subatlantique (2800 cal. BP à nos jours) et surtout une homogénéité des datations correspondant aux périodes chrono-culturelles du second âge du Fer ;

la Tène de 2400/2002 cal. BP (-450/-52 cal. AD) et la période romaine de 2002/1450 cal. BP (-52/250 cal. AD).

2.5 Etudes polliniques et des Microfossiles Non Polliniques (MNPs)

Quelques échantillons de pollen furent analysés sur les fonds sédimentaires de mardelles en Lorraine par A. Hölzer (dans Barth *et al.*, 2001) dans la forêt Sierck et H. Richard (dans Blouet & Klag, 1987) en forêt de Knutange, ces deux dépressions étant localisées dans le nord de la Moselle (France). Ils démontrent le caractère récent du remplissage au cours du Subatlantique (2800 cal. BP à nos jours), grâce à la présence de pollen de charme (*Carpinus*). Toutefois avant les travaux de Ruffaldi *et al.* (2007), aucune étude palynologique complète d'une mardelle n'avait été réalisée. Ce travail sur la mardelle d'Assenoncourt (sud-Moselle, France) a démontré la conservation optimale des grains de pollen ainsi que l'intérêt de ces structures pour reconstituer l'histoire des changements d'usages des sols depuis 2000 ans dans ces zones de basses altitudes, d'habitude si pauvres en milieux propices aux études paléo-environnementales (*cf. Chapitre 5*). Pour répondre à la question de leur origine, nous nous focaliserons sur les premiers centimètres de la sédimentation (70 cm) afin de définir le contexte environnemental dans lequel ces mardelles se sont formées et d'identifier une possible anthropisation des paysages.

Les analyses stratigraphiques (LOI), polliniques et des Microfossiles Non Polliniques (MNP) pointent une concordance des résultats obtenus sur l'ensemble des séquences, que ces structures soient actuellement implantées en milieu ouvert (Bisping) ou en contexte forestier (Römersberg, Sarrebourg et St. Jean) (Fig. 3.12).

Dans chaque cas (SAR1, RÖM1 et BIS1), la sédimentation débute (US1) par des argiles très pauvres en matière organique (MO < 10%) et très denses ($DS_{(g/cm^3)} \sim 0,6$) emprisonnant un faible pourcentage de pollen arboréens (AP/T < 40%) dominé par le chêne (*Quercus*), mais de faible proportion des autres espèces de la chênaie-charmaie-hêtraie (*Carpinus* et *Fagus*) (Fig. 3.13). Le cas de St. Jean (STJ1) est légèrement différent avec des proportions de noisetier (*Corylus*), espèce de lisière (Bégeot, 1998), de charme (*Carpinus*) et de hêtre (*Fagus*) plus importantes. Ce paysage ouvert est également très anthropisé avec principalement des pâturages (*Plantago lanceolata*, Apiaceae, Anthemideae et Cichorioideae) étayé par la présence de Microfossiles Non Polliniques (*Sporormiella*-type et *Podospora*-type) ; et de quelques champs cultivés (*Cerealia*-type). Des plantes aquatiques (*Myriophyllum*, *Potamogeton*, *Typha latifolia* et *Sparganium*-type) colonisent le centre de la structure (SAR1, BIS1) alors que des espèces méso-hygrophiles (Cyperaceae, *Alisma plantago-aquatica* et *Filipendula*-type) s'implantent sur leur pourtour (Fig. 3.14). La présence de plantes aquatiques et d'oogones de characeae (RÖM1) prouve l'existence

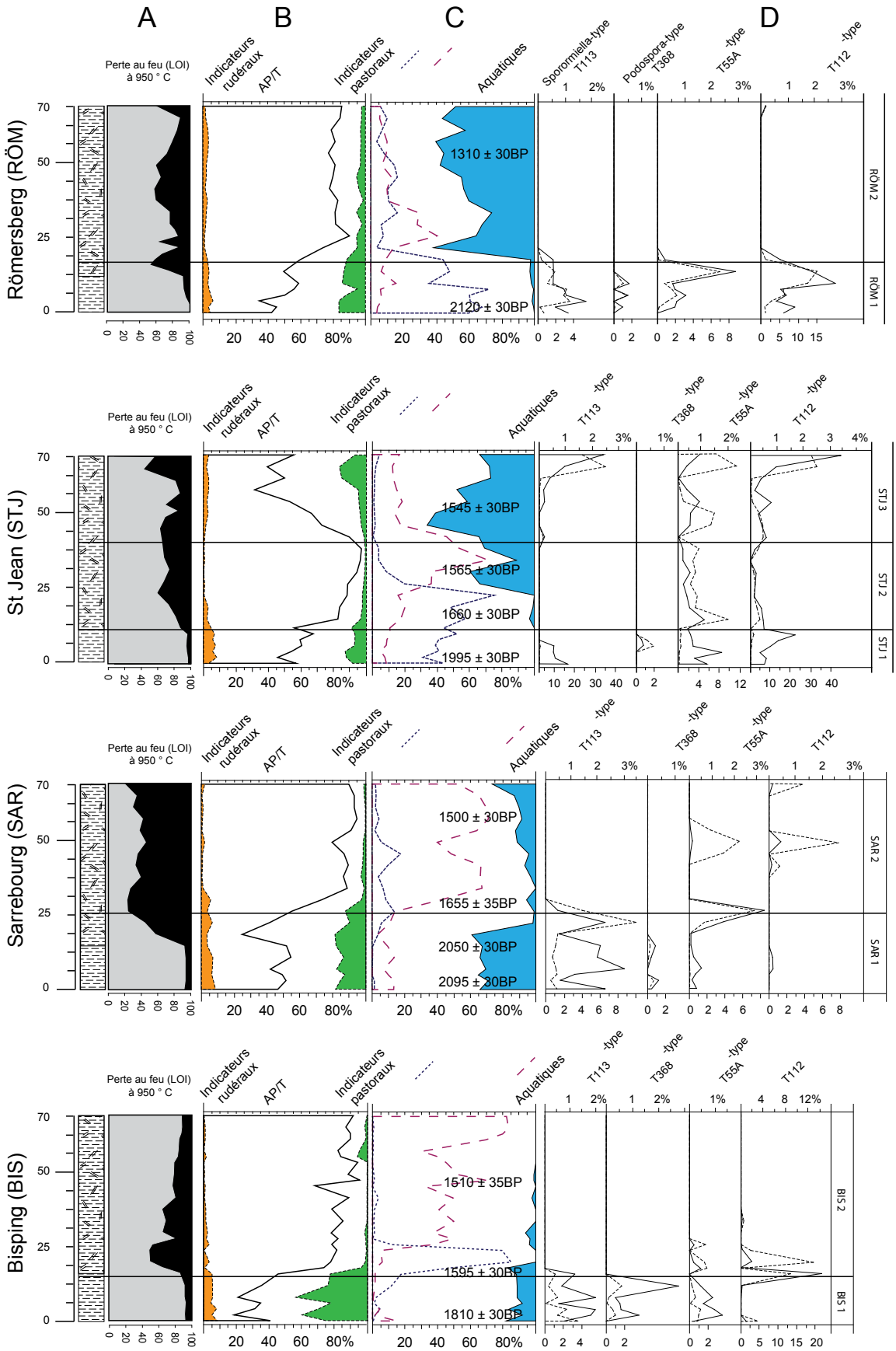


Figure 3.12 - A : Perte au feu (LOI) (% de MO en noir) ; B : diagramme pollinique simplifié de la végétation autour de la mardelle ; C : diagramme simplifié de la végétation implantée sur la mardelle ; D : pourcentages (ligne pleine) et concentrations (/1000, ligne en pointillée) des Microphossiles Non-Polliniques sur les 70 premiers centimètres des séquences du Römersberg (RÖM), de St. Jean (STJ), de Sarrebourg (SAR) et de Bisping (BIS).

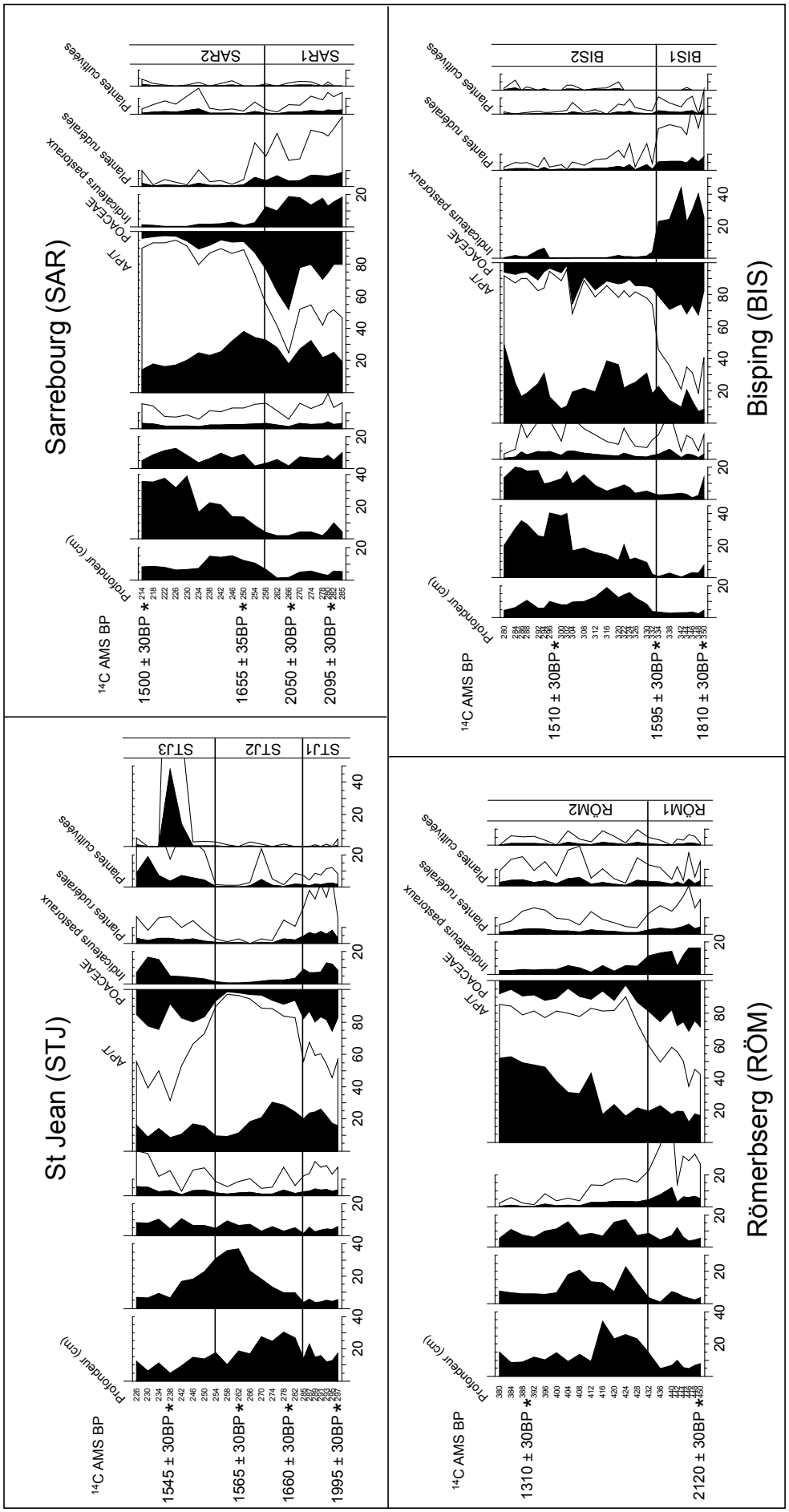


Figure 3.13 - Diagrammes polliniques simplifiés de la végétation autour des mardelles de Saint Jean (STJ), Sarrebourg (SAR), Römersberg (RÖM) et Bisping (BIS). AP/T : Arboreal Pollen / Total Land Pollen ; Plantes cultivées : *Cerealia*-type et *Secale*-type ; Indicateurs pastoraux : Apiaceae, Anthemideae, *Centaurea jacea/nigra*, Cihorioideae, *Plantago lanceolata*, Ranunculaceae et *Rumex acetosa/acetosella* ; Plantes rudérales/messicoles : *Artemisia*, *Centaurea cyanus*, Chenopodiaceae, *Fagopyrum*, *Papaver*, *Plantago major/media*, *Polygonum aviculare* et Urticaceae. Les courbes d'éxagération correspondent à un facteur *5.

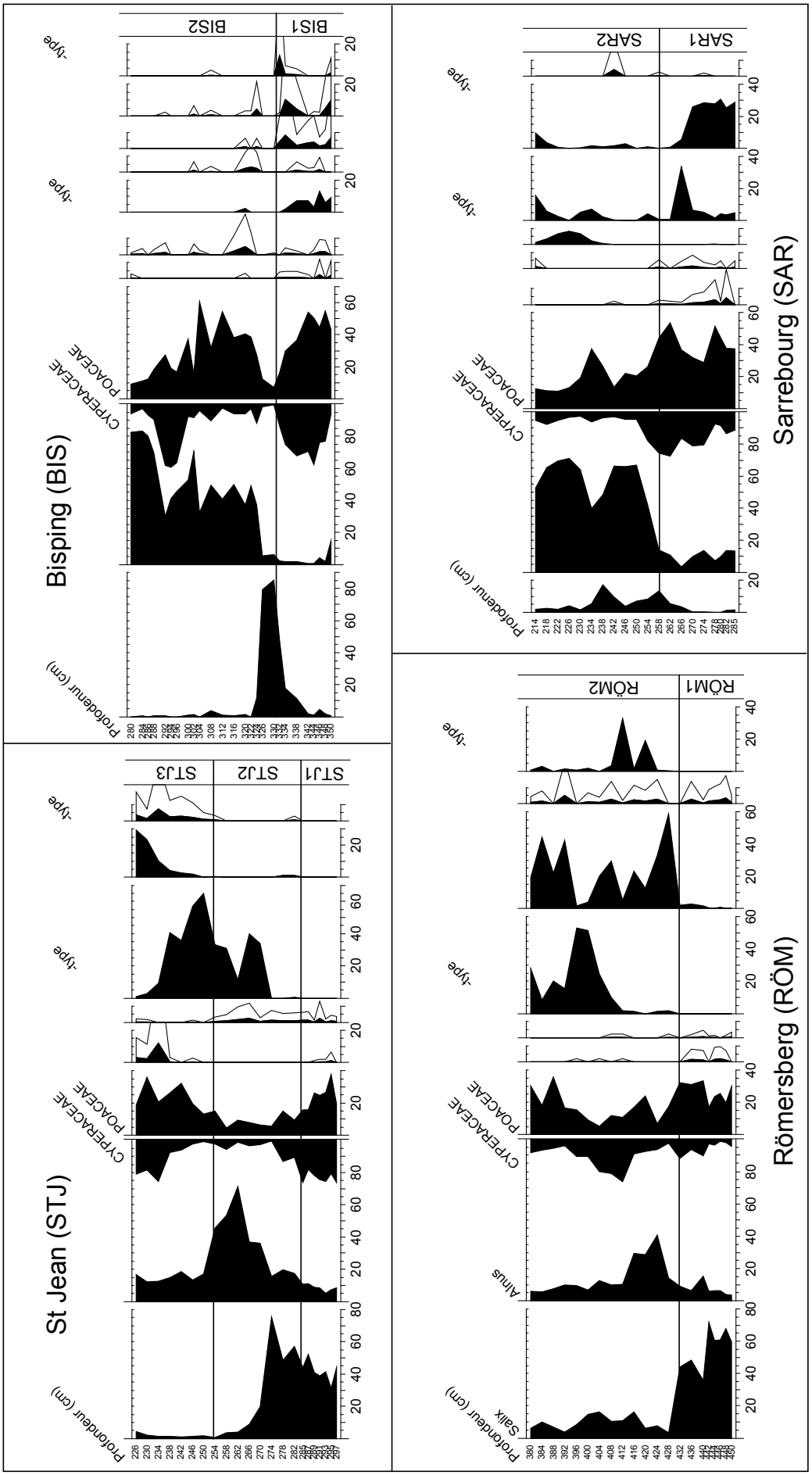


Figure 3.14 - Diagrammes polliniques simplifiés de la végétation installée sur les mardelles de Saint Jean (STJ), Sarrebourg (SAR), Römersberg (RÖM) et Bisping (BIS). Les courbes d'exagération correspondent à un facteur *5.

d'une lame d'eau d'au moins un mètre dès le début de la sédimentation. Certaines structures (STJ1, RÖM1) sont plutôt bordées de saule (*Salix*), pouvant correspondre à *Salix cinerea* espèce typique des mardelles actuellement en milieux ouverts (Thoen & Hérault, 2007), limitant alors le développement des plantes aquatiques. Cette différence de couverture du saule autour de la mardelle pourrait traduire une intensité d'utilisation et/ou d'entretien.

Dans l'unité stratigraphique suivante (US2), la proportion de matière organique augmente rapidement (> 40%) avec des accumulations de bois et de feuilles dans une matrice argileuse moins dense ($DS_{(g/cm^3)}$ ~ 0,2). Dès lors, le paysage est beaucoup plus fermé (AP/T > 80%) avec une dynamique de recolonisation forestière initiée par le noisetier (*Corylus*), puis le charme (*Carpinus*) et l'implantation au sein de la mardelle d'*Alnus*, espèce typique des mardelles forestières actuelles (Hérault & Thoen, 2007). Le contexte paysager autour de toutes nos structures se modifie rapidement, au milieu ouvert, pâturé et cultivé de l'antiquité se substitue un milieu fermé et forestier. Ceci provoque un changement brutal de l'origine des apports sédimentaires, d'allochtone à autochtone, illustré par des dépôts de feuilles provenant de la canopée surplombant la structure (*Quercus*, *Fagus* et *Carpinus*) et d'espèces implantées sur la structure (*Alnus*, *Salix*), et par le développement de champignons coprophiles (*Cercophora*-type et *Sordaria*-type) plutôt inféodés à la matière organique en décomposition (feuilles, tiges…) (Mighall *et al.*, 2006 ; Van Geel *et al.*, 2003) (*cf. Fig. 3.12*).

3. Discussion et conclusions

Les mares ou mardelles (mares intra-forestières) ont laissé très peu de traces dans les sources textuelles ou iconographiques. « *Trop ptites, trop fréquentes, trops vues [...] l'historien [...] n'en retient que de brèves mentions : nuisance locale, conflit de propriété, ...* » (Sajajoli, 2007). De fait, la seule information textuelle que nous possédons sur les mardelles date de 1700 (pied terrier d'Assenoncourt) où l'on donne des terres supplémentaires aux acquéreurs « *en récompense de mare »* (Zeller, 2011). Ces documents nous renseignent sur l'inutilité de ces mares à cette époque, mais aucune information n'est disponible sur leur origine.

3.1 Les mardelles : formation naturelle, anthropique ou remodelage ?

En Lorraine, la théorie de formation généralement acceptée est actuellement celle de la dissolution de lentilles de gypse, de carbonates ou de sel gemme inclues dans les socles géologiques sous-jacents (Delafosse, 1948). Cette thèse est appuié par des témoignage de paysans constatant des effondrement de terrain brutaux dans leur prairies (*cf. Annexe 2*). Certains effondrement en système forestier et photographiés par Delafosse (Annexe 12) sont selon cet auteur « *des*

types de formations récentes » aboutissant à terme à des mardelles. Ces effondrements en forme d'entonnoir de quelques mètres de diamètre et de profondeur sont effectivement visibles sur certains terrains du Keuper supérieur (Annexe 13).
Cependant sur les terrains du Keuper, aucune lentille de minéraux solubles n'a été observée lors des sondages géotechniques le long de la future ligne LGV où 260 structures sont pourtant identifiées. De plus, la présence de mardelles sur les grès ne peut être expliquée par des phénomènes géologiques naturels de dissolution.
Quelle que soit la taille, la profondeur ou l'implantation actuelle de nos structures, les débuts de la sédimentation présentent une grande concordance temporelle et datent du second Age du Fer (La Tène) ou de l'Antiquité. Les structures datées du Haut-Moyen âge sont certainement plus anciennes car nous n'avons pu atteindre ni l'US1 ni le socle géologique lors du prélèvement ; la fouille de la mardelle de Bisping ayant par exemple démontrée que les 16 cm de sédiments bleu-gris du début peuvent représenter de 300 à 400 ans. Ces datations radiocarbone coïncident avec les analyses polliniques réalisées en Moselle (Hölzer dans Barth *et al.*, 2001 ; Richard dans Blouet & Klag, 1987 ; Grenier, 1906) et également avec des datations OSL et ^{14}C en Belgique (Gillijns *et al.*, 2005 ; Vanwalleghem *et al.*, 2006b).
Des phénomènes naturels tels que les phénomènes périglaciaires (*pingos*) (Pissart, 2003) ou des effondrements karstiques types dolines colmatées, appelées également « mardelles » dans la Nièvre (Planchais, 1966 ; I. Jouffroy, communication personnelle), auraient du former des structures plus anciennes ou plus récentes que nous n'avons pas retrouvé. Leur morphologie en forme de baignoire avec un fond horizontal et des bords coupant le socle marneux en place ne correspond pas à une dépression formée par un processus de dissolution ou à un sous-tirage karstique. L'hypothèse d'un remodelage anthropique après leur formation naturelle est aussi peu probable dans la mesure ou l'on sattendrait alors à un hiatus dans la colonne sédimentaire, que nous n'avons pas trouvé. D'autre part, on peut s'intérroger sur l'intérêt que des populations trouveraient à creuser dans une dépression humide.

Ces résultats, obtenus pour des mardelles implantées sur les marnes irisées du Keuper inférieur, suggérent donc que ces structures ne sont pas le fruit d'un processus naturel mais plutôt une création anthropique.

3.2 But du creusement ?

Le pic de pollen de *Cannabis/Humulus* enregistré à St. Jean (à 238 cm de profondeur) suggère une utilisation de ces structures en tant que zone de rouissage durant le Haut-Moyen Age (Mercuri *et al.*, 2002). Ce type d'usage est également proposé par les analyses polliniques des mardelles

d'Assenoncourt (Ruffaldi *et al.*, 2007) et de Knutange (H. Richard dans Blouet & Klag, 1987). Cependant puisque ces pics ne sont pas retrouvés dans les sédiments basaux, un creusement pour une utilisation première en tant que zone de rouissage n'est pas envisageable.

Les proportions importantes d'indicateurs polliniques pastoraux et de champignons coprophiles (*Sporormiella*-type) identifiés dans les sédiments basaux suggèrent une utilisation en tant que réservoir à eau pour le cheptel. En effet, l'approvisionnement hydrique pour le bétail et les hommes est problématique dans cette partie du Plateau lorrain où les cours d'eau sont souvent à sec durant l'été (Lutz, 1971, 1972). L'abondance des mardelles dans le paysage pourrait être utilisée en tant qu'indicateur de la pression pastorale pendant le second age du Fer et l'Antiquité. La découverte par M. Gazenbeek à Cutting (CUT) de nombreux ossements de bovins dans les couches à la base de la sédimentation de la mardelle (Annexe 14) confirme une utilisation en tant que point d'eau pour le bétail lors de leur création.

Comme aucune accumulation de matériau excavé n'a jamais été identifiée autour de nos structures, le but du creusement semble être le matériel lui-même. Le matériel « manquant » correspond généralement aux marnes bariolées du Keuper inférieur. Wingert (1996) propose que ces mardelles soient les fantômes de l'extraction de nodules de fer inclus dans ces marnes mais aucun nodule n'a été découvert lors des fouilles archéologiques. L'extraction d'argile pour la confection de tuiles (Härbele, 1938) ou pour la construction d'habitats (torchis) peut être envisagée. Malheureusement, très peu d'indications d'habitats (tuiles, céramiques, trou de poteaux) ont été découverts en forêt lors des sondages archéologiques le long de la LGV (Goepp, 2010). Les constructions en torchis ne laissent généralement que peu de traces identifiables et d'autant moins si les sols ont subi une érosion postérieure. Le site de Cutting (CUT) apporte également sur ce point un éclairage important. En effet, des vestiges de plusieurs habitats protohistoriques (trous de poteaux) ont été mis au jour à quelques dizaines de mètres de la mardelle, dans laquelle d'ailleurs on retrouve des fragments de poteries protohistoriques dans l'unité stratigraphique en contact avec le socle géologiques (*cf. Annexe 14*).

Comme proposé par Gillijns *et al.* (2005), le marnage des limons acides en surface pourrait également être une utilisation des matériaux excavés et le but premier du creusement de ces dépressions. En effet, dans les zones de dépôts limoneux épais, les sols acides en surface sont fréquents avec des pH en dessous de 4,5 au niveau de l'horizon A.

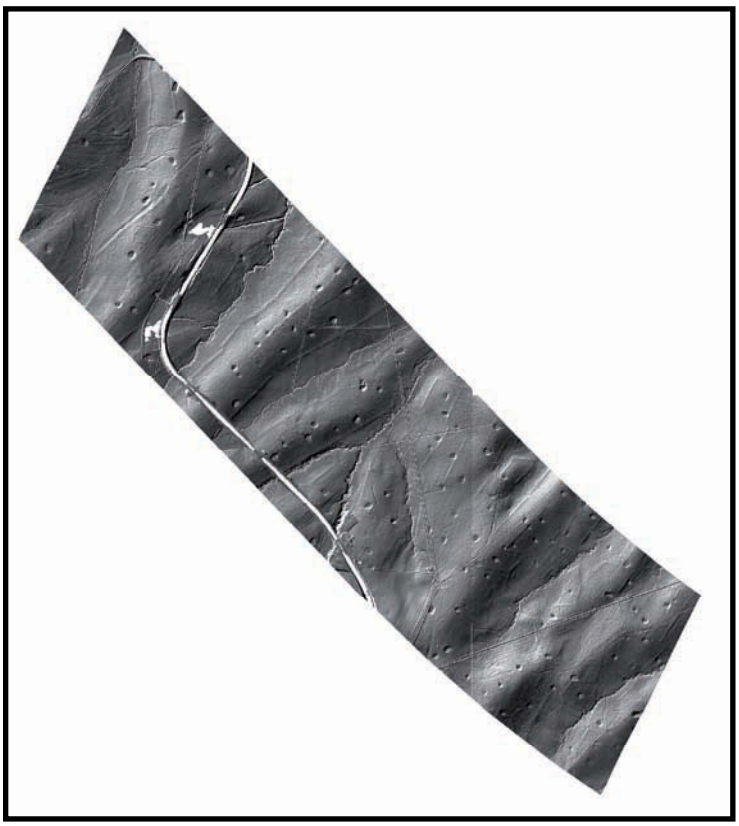
Ces Luvisol sont potentiellement bon pour le pâturage mais peuvent être trop acides pour le développement de l'agriculture sans amendement carbonaté. Le marnage était une pratique connue en Gaule et en Grande-Bretagne et utilisée à cette époque pour l'agriculture comme le décrit Pline l'Ancien (*Caius Plinius Secundus*) dans son encyclopédie. De plus selon *Pline l'Ancien*, les *Ubiens* qui était alors un peuple germanique proche des Trévires et occupant la

région actuelle de Cologne (Allemagne), creusaient à 3 pieds (environ 1 m) sous une terre très fertile (alluvions du Rhin) pour extraire la marne avant d'amender les sols environnants afin d'améliorer les rendements agricoles. Dans les zones géographiques présentant de fortes densités de ces dépressions, cette pratique pourrait avoir modifié sur une grande surface, la composition chimique des horizons supérieurs des sols. Cette question sera plus amplement développée dans le *Chapitre 5* de ce manuscrit.

Chapitre 4

Inventaire, distribution et génèse des dépressions fermées du Plateau lorrain

Apport de la prospection LiDAR (Light Detection And Ranging)



la ferme d'Albeschaux (Belles-Forêts, Moselle).

1. Introduction

Le développement de la télédétection LiDAR aéroporté dans le domaine de l'archéologie a bouleversé les méthodes de prospection. Les premières applications de cette méthode de télédétection en milieu forestier datent de 2003 en Allemagne (Sittler, 2004) puis elles se sont développées dans d'autres régions du monde (Bewley *et al.*, 2005 ; Devereux *et al.*, 2005, 2008 ; Doneus *et al.*, 2008 ; Gallagher & Josephs, 2008 ; Risbøl *et al.*, 2006) et démontrent la possibilité de repérer des vestiges (bâtiments, parcellaires, traces de culture…) archéologiques dans ces contextes forestiers généralement peu favorables à la prospection pédestre ou fournissant des données lacunaires. Cette méthode offre une vision spatiale et continue des vestiges archéologiques en les replaçant dans un contexte environnemental global permettant de créer des liens géographiques avec d'autres sites (Crutchley, 2006). En France, la première utilisation s'est déroulée en 2006 avec le survol du massif forestier de la Forêt de Haye couvrant 11 600 ha à l'ouest de la ville de Nancy (Meurthe-et-Moselle, France) (Georges-Leroy *et al.*, 2007, 2008, 2009).

L'utilisation de données LiDAR (Light Detection And Ranging) offre la possibilité de réaliser un inventaire *a priori* exhaustif des mardelles que ce soit en milieu ouvert (prairies, champs) ou forestier et sur les différents substrats géologiques rencontrés. La précision du Modèle Numérique de Terrain (MNT) reconstruit à partir des données LiDAR, associée aux fonctions d'un Système d'Information Géographique (SIG), permet la caractérisation de ces phénomènes géomorphologiques. Nos deux jeux de données LiDAR, obtenus lors des prospections LGV et IGN (*cf. Chapitre 2*) et couvrant 225 km² dans le département de la Moselle (Lorraine), sont complétés par un autre jeu de données LiDAR dans le département du Doubs (Franche-Comté). Cette région, au contexte géologique calcaire, est propice à la formation de phénomènes naturels de surface (dolines) grâce à un riche système karstique.

Des méthodologies proches sont alors utilisées sur les trois jeux de données LiDAR afin de définir (1) la densité d'implantation actuelle des structures suivant les contextes paysagers (champs, prairies, forêts) et géologiques, (2) leurs caractéristiques métriques et (3) la relation entre les mardelles et le contexte archéologique local renseignés par les vols LiDAR, les fouilles archéologiques de l'INRAP en 2009 et 2010 le long du tracé LGV et les données disponibles dans la carte archéologique (Flotté & Fuchs, 2004).

2. Méthodologie

2.1 Les prospections LiDAR utilisées en Lorraine

Le but premier et la résolution de nos deux jeux de données LiDAR sont différents (cf. *Chapitre 2*). Le choix du LiDAR le mieux adapté aux différentes problématiques se base sur leurs paramètres

géographiques et leurs biais de résolution : (1) le vol LiDAR LGV est spécifiquement utilisé, grâce à sa grande précision, pour délimiter et mesurer la taille des mardelles. La qualité des images obtenues permet d'identifier et de dessiner le contour de chacune d'entre-elles quel que soit le contexte paysager actuel (*cf. Chapitre 3*) ; (2) Le LiDAR IGN est plus adapté à l'observation de la position topographique (haut-, mi- ou bas- de versant) des mardelles grâce à son orientation parallèle à la topographie naturelle. Les inventaires sur ces deux bandes LiDAR sont confrontés à des données d'occupation des sols (Corine Land Cover, 2006) afin de calculer des densités de structure par km² suivant les différents contextes paysagers, et à des cartes anciennes (Carte de l'Etat Major, 1826-1831) afin d'observer les évolutions récentes des paysages dans notre zone d'étude ayant pu jouer sur leurs paramètres métriques.

Pour l'étude de leur localisation topographique, l'extension ArcView *Topographic Position Index* (Jenness, 2006) fut testée mais les faibles variations altitudinales ne permettent pas, dans notre cas, une séparation satisfaisante des zones topographiques par cet outil. Dès lors le choix fut de tracer manuellement les lignes de crêtes en utilisant les courbes de niveaux (fonction *Contour*, 50 cm) et de délimiter les fonds de vallons en s'aidant de ces mêmes courbes de niveaux et de l'extension *ArcHydro_9* traçant le réseau hydrographique. Suite à ce travail, nous obtenons une carte où sont figurés les lignes de crêtes, les lignes de fond de vallons ainsi que les points centraux (centroïdes) de nos structures. Pour chaque centroïde, la distance à la ligne de crête et au fond de vallon est mesurée automatiquement (fonction *Near*) puis transformée en un rapport Distance crête (m) / Distance vallon (m).

2.1.1 Etalonnage des données

Un étalonnage des données fournies par nos vols LiDAR est nécessaire afin d'utiliser nos deux bandes pour des calculs de densité selon les contextes paysagers et géologiques, ceci malgré leur différence de résolution (*cf. Chapitre 2*). Malheureusement, la zone de recoupement entre le LiDAR LGV et IGN ne correspond qu'à 3,63 km² composé en grande majorité de forêts (3,52 km²) et de quelques champs (0,07 km²) et prairies (0,04 km²). Grâce aux données LGV, nous identifions 140 dépressions dans cette fenêtre de recoupement (Fig. 4.1).

Cette fenêtre étant d'une superficie trop faible pour être utilisée seule, deux autres zones localisées en contexte forestier et recoupant la bande LiDAR IGN, la zone de Fénétrange (6,43 km² et 96 mardelles soit 15 par km²) (Ramm, 1999) et de Mittersheim (5 km² et 117 mardelles soit 23,4 par km²) (C. Fischer, document personnel) serviront de zone de contrôle (*cf. Fig. 4.1*).

Ces inventaires ont été réalisés par prospection pédestre ainsi leurs exhaustivités sont évidemment difficile à confirmer. Si l'on compare séparément les dénombrements obtenus en utilisant les

images du vol LiDAR IGN avec celles obtenues par le vol LiDAR LGV et les données de terrain, nous obtenons des densités beaucoup plus faibles :

- pour la zone de recouvrement des deux bandes LiDAR, on identifie 41 mardelles par le LiDAR IGN et 140 mardelles par le LiDAR LGV (Fig. 4.2) ; soit un facteur 3,4 de biais

- pour Fénétrange, on identifie 65 mardelles par le LiDAR IGN et 96 par le travail de terrain (Fig. 4.3) ; soit un biais de 1,5

- pour Mittersheim, on identifie 56 mardelles par le LiDAR IGN et 107 par le travail de terrain (Fig. 4.4) ; soit un biais de 1,9

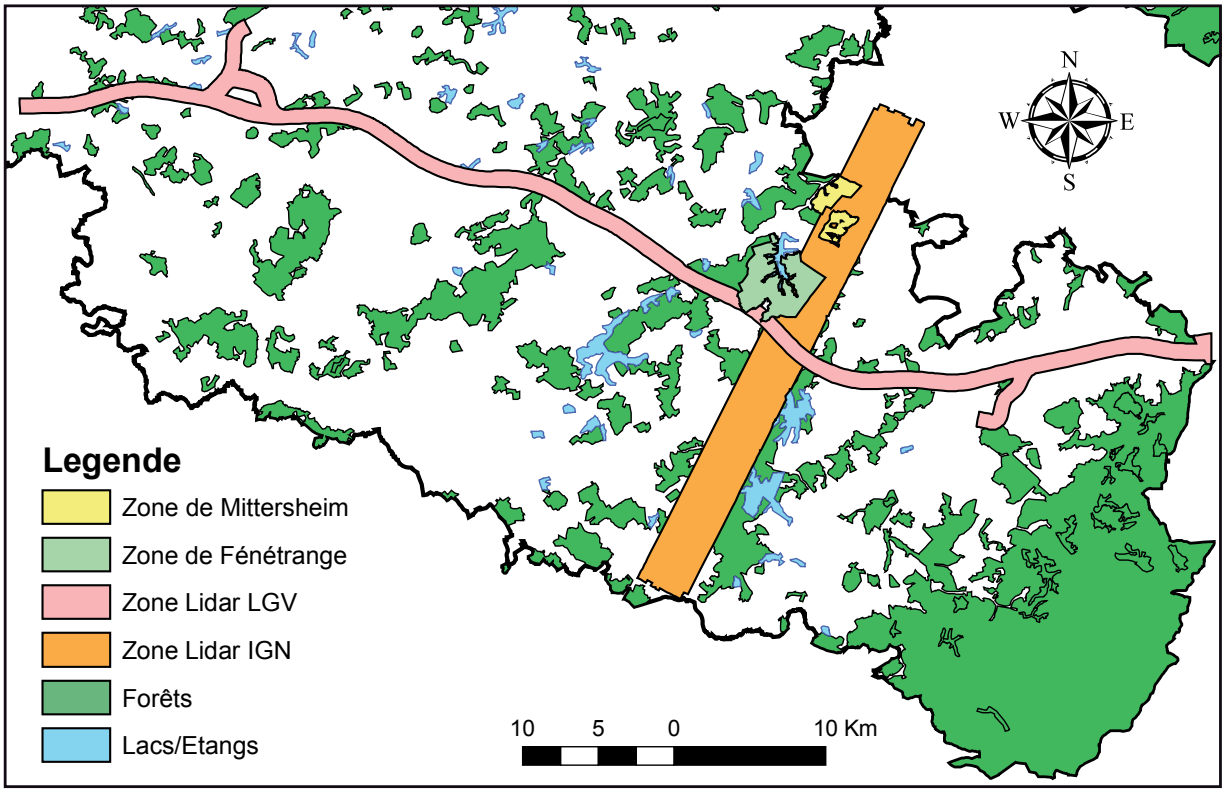


Figure 4.1 - Carte de localisation des Zone Lidar LGV et IGN et des zones de contrôles de prospection pédestres de Fénétrange (Ramm, 1999) et de Mittersheim (Ficher, données personnelles).

La valeur numérique de ces biais est de plus d'un facteur 2 entre le secteur du LiDAR LGV et celui de Fénétrange. Si l'inventaire de Fénétrange n'est certainement pas exhaustif car plutôt basé sur la question de la biodiversité végétale des mardelles plutôt qu'à leur dénombrement, l'inventaire réalisé par le garde ONF sur le triage forestier de Mittersheim (C. Fischer) dont il s'est occupé pendant des dizaines d'années, l'est probablement plus.

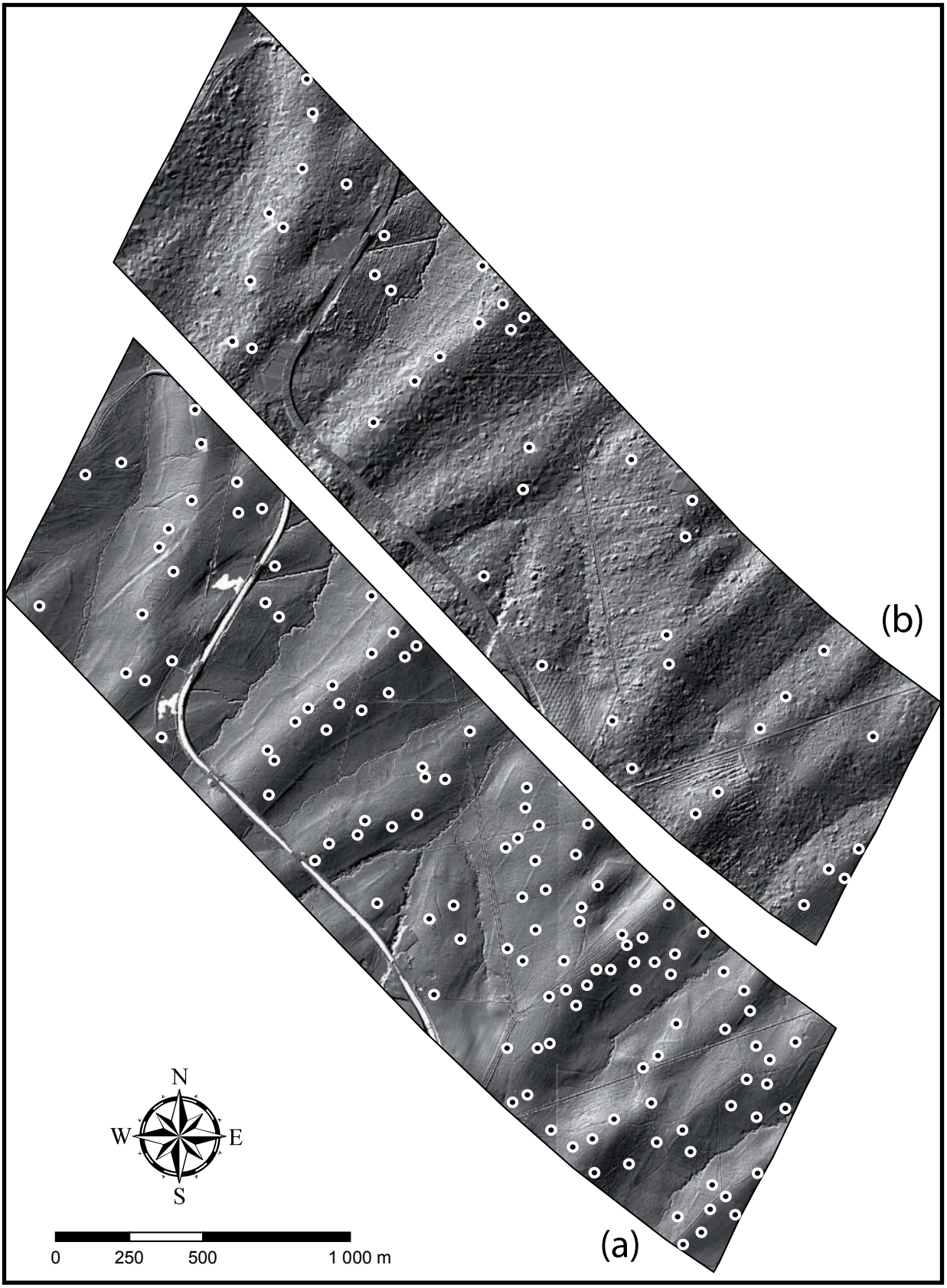


Figure 4.2 - Images LiDAR (ombrage 315°, élévation 45°) de la zone de recoupement entre nos deux bandes LiDAR LGV et IGN. Les ronds blancs et noirs représentent les mardelles identifiées. On identifie 140 mardelles sur la bande de prospection LiDAR LGV(a) et 41 mardelles sur la bande de prospection IGN (b), soit un biais d'un facteur 3,4.

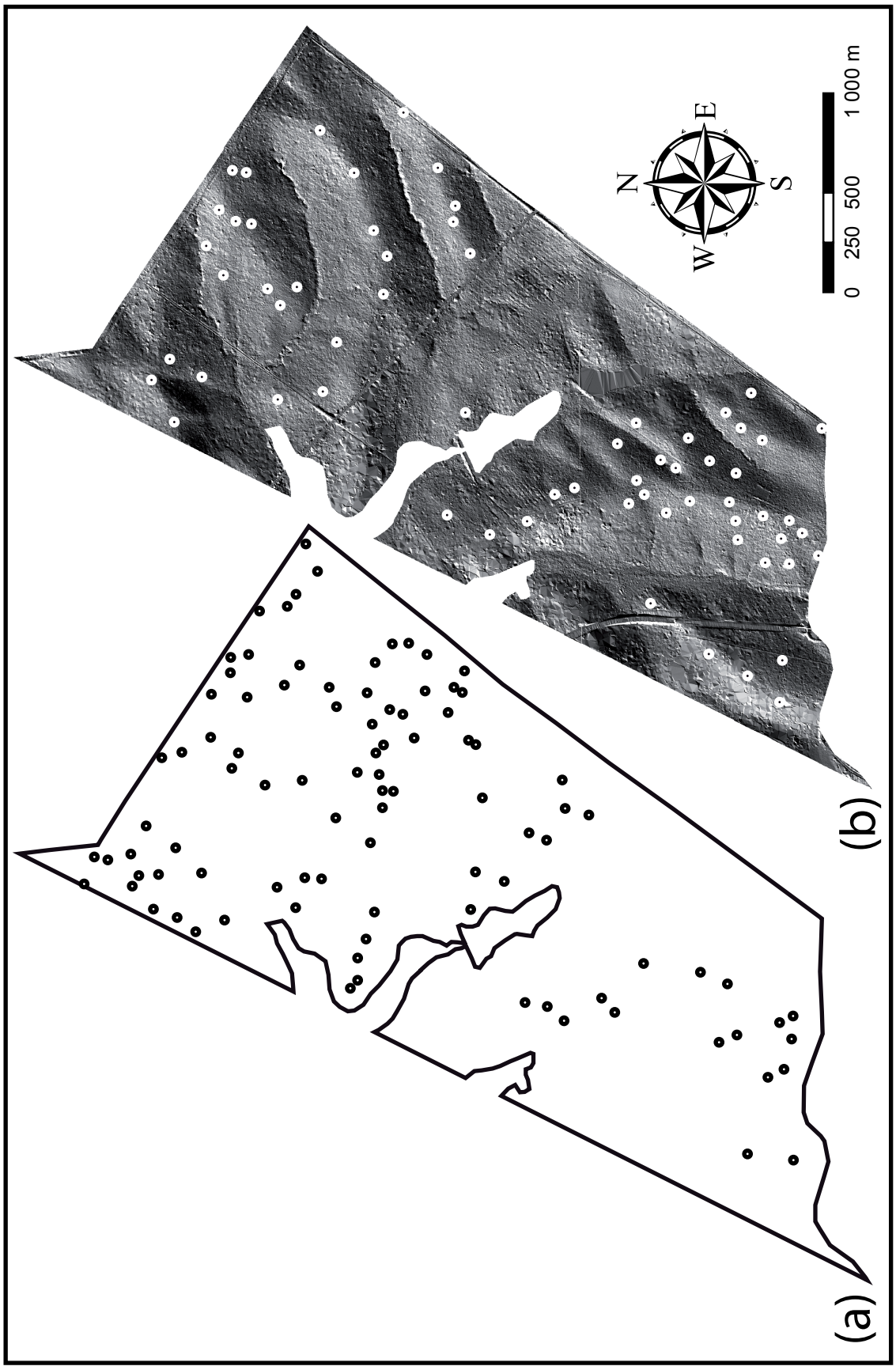


Figure 4.3 - Carte de la forêt Domaniale de Fénétrange (a) et images de la prospection LiDAR (ombrage 315°, élévation 45°) de la même zone. Les taches noires représentent les mardelles identifiées par C. Fischer lors de prospection de terrain (a) soit 107 mardelles. Les ronds blancs et noirs représentent les mardelles identifiées sur la prospection LidAR IGN (b) soit 56 mardelles.

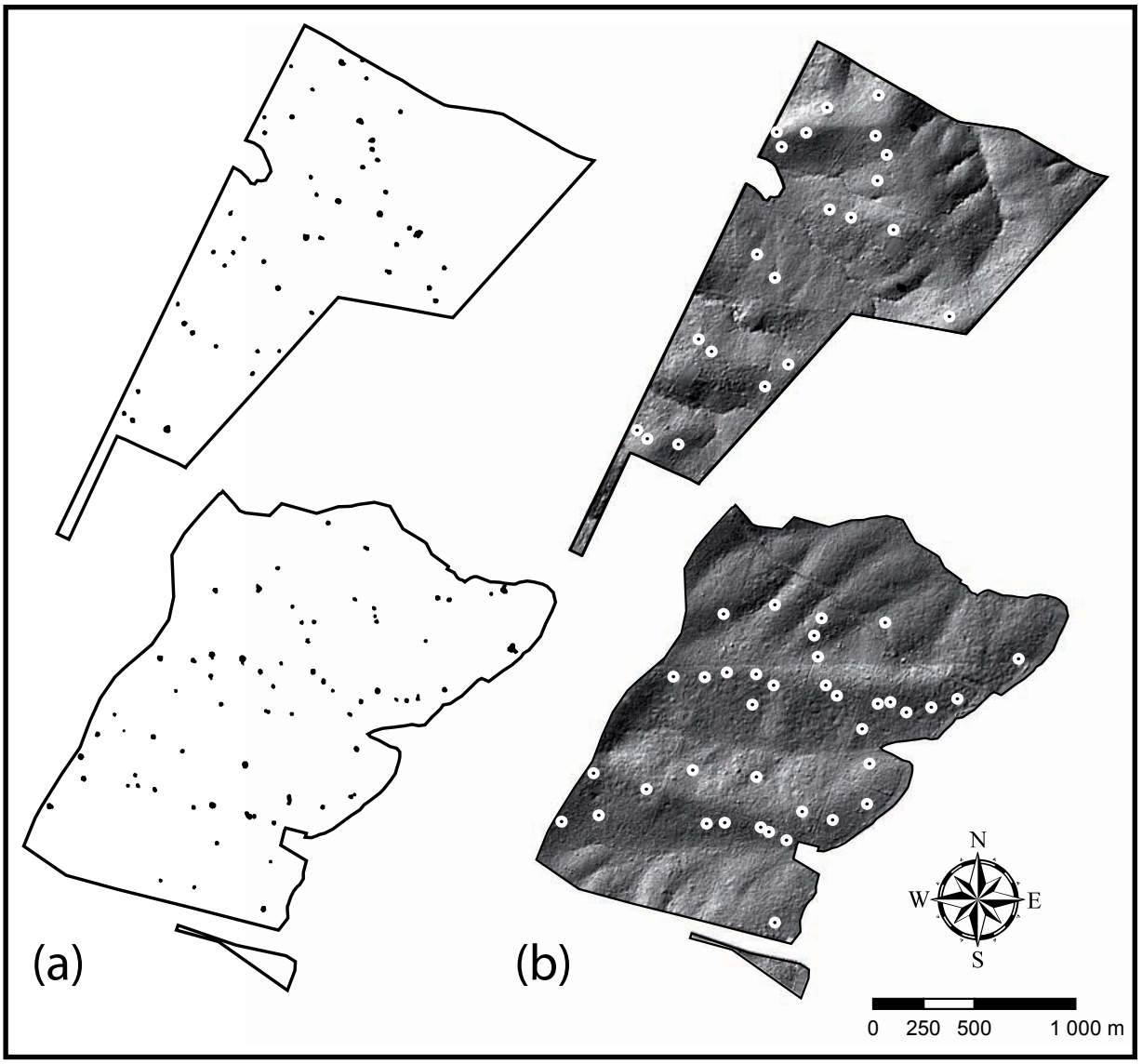


Figure 4.4 - Carte de la forêt Domaniale de Mittersheim (a) et images de la prospection LiDAR (ombrage 315°, élévation 45°) de la même zone. Les taches noires représentent les mardelles identifiées par C. Fischer lors de prospection de terrain (a) soit 107 mardelles. Les ronds blancs et noirs représentent les mardelles identifiées sur la prospection LidAR IGN (b) soit 56 mardelles.

Une grande proportion de ce biais est certainement lié à la qualité du MNT de la prospection LiDAR IGN selon le contexte paysager actuel (forêt, prairies ou champs) et, en contexte forestier, suivant l'âge du peuplement (perchis, gaulis ou futaie) (*cf. Chapitre 2*). Puisque les images fournies par les données du LiDAR IGN ont été réalisées au cours de l'été, leur qualité est décroissante suivant la densité du feuillage et l'âge du peuplement forestier.

La zone la mieux prospectée et ayant la meilleure résolution est celle de Mittersheim, proposant un biais de 1,9 entre nos données de terrain et nos relevés LiDAR IGN. Si l'on considère l'ensemble des données, quelle que soit la méthode utilisée, nous obtenons une zone de contrôle de 15 km² regroupant 343 mardelles (LiDAR LGV, Fénétrange et Mittersheim) dont 160 identifiées également à l'aide des prospections LiDAR IGN, soit un facteur de 2,1. Ce facteur sera appliqué dans les calculs de densité de mardelles en contexte forestier sur la bande LiDAR IGN dans la suite de ce chapitre.

2.2 Le LiDAR en Franche-Comté

Dans le cadre du projet LIEPPEC (LiDAR pour l'Etude des Paysages Passés et Contemporains), des données LiDAR (8 points par m²) recouvrant une superficie de 241 km² ont été acquises en 2009 autour des villes de Besançon et du site antique de Mandeure (*Epomanduodurum*) (Fig.4.5).

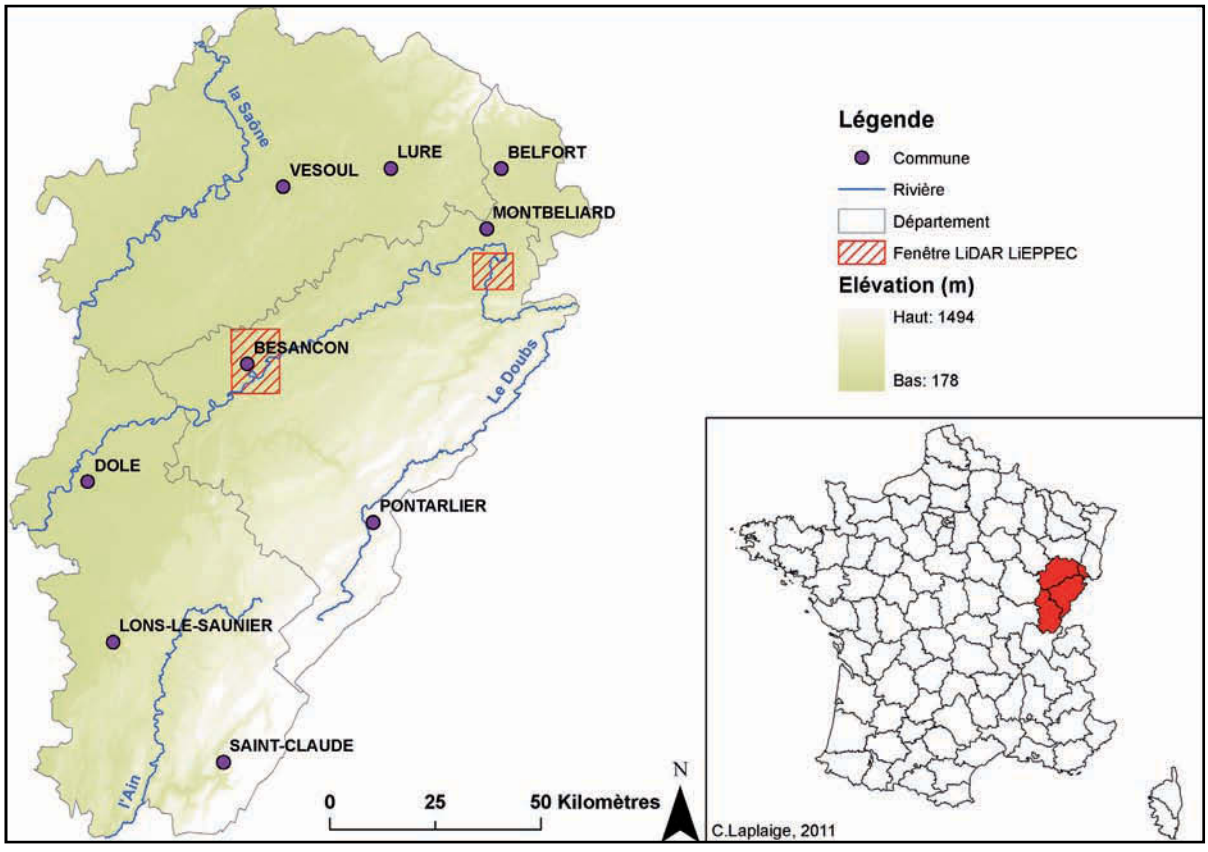


Figure 4.5 - Carte de localisation des zones LiDAR du projet LIEPPEC autour de la ville de Besançon et du site antique de Mandeure (Doubs, Franche-Comté).

Dans ce manuscrit, nous nous focaliserons plus particulièrement sur la forêt de Chailluz localisée à l'abord de la commune de Besançon (Doubs, Franche-Comté). Ce grand massif boisé (1600 ha) est implanté sur des terrains calcaires du Bathonien et du Bajocien supérieur (~170 Ma) qui sont très riches en dolines. Ces phénomènes géomorphologiques se forment naturellement en contexte karstique par dissolution des carbonates en profondeur suivi d'un effondrement des couches géologiques en surface.

3. Résultats et interprétations

3.1 Contexte général

En Lorraine, sans différencier l'implantation paysagère actuelle (forêt / champ) ou géologique, la taille médiane des dépressions est de 347 m² (moyenne de 448,7 m²). Ces structures étant généralement de formes circulaires ou ovoïdes (Barth et *al.*, 2001), leur diamètre est approximativement de 20 mètres. Leurs superficies se distribuent très majoritairement (82%) suivant des tailles de 10 à 30 m de diamètres (78 à 700 m²) ou pour 12% d'entre elles entre 30 à 40 m de diamètres (700 à 1256 m²). Les structures supérieures à 40 m ou inférieures à 10 m de diamètre ne représentent dans les deux cas que 3% des structures inventoriées (Fig. 4.6a).
En Franche-Comté, les superficies des dolines sont beaucoup plus importantes avec une médiane de 2230 m² (moyenne de 2656 m²) correspondant à des structures d'environ 53 m de diamètre. Des classes de tailles sont difficilement identifiables (Fig. 4.6b).

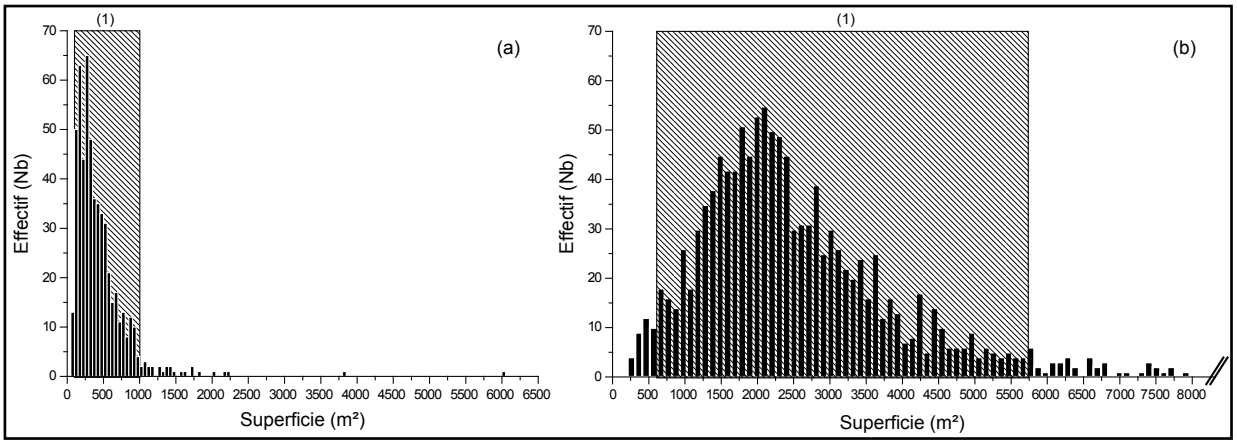


Figure 4.6 - Histogramme de distribution des superficies (m²) des mardelles en Lorraine (a) et des dolines de la forêt de Chailluz en Franche-comté (b), la surface grisée encadre 95% de la distribution.

3.2 Contexte paysager

En comparant nos proportions de structures établies en contexte forestier ou ouvert (champs et pâtures), nous obtenons que ce soit sur la zone LGV (69%) ou la bande IGN (71%) des proportions plus importantes en forêts. Une fois ces valeurs exprimées en densité (mardelles/

km²), ces observations sont toujours valables et d'autant plus marquées (Tab. 4.1).
La comparaison des cartes du début du 19ème siècle et l'occupation actuelle des sols met en lumière une grande stabilité des espaces forestiers dans notre zone d'étude avec de faibles augmentations (3,4 km² sur le LiDAR IGN soit 4%) ou une légère diminution (1,4 km² sur le LIDAR LGV soit 6%). Les modifications paysagères sont principalement le fait de l'accroissement des espaces prairiaux au détriment des champs au cours du 20ème siècle. Il est d'ailleurs intéressant de noter la quasi absence de mardelle dans les espaces occupés par les prairies au 19ème siècle couvrant pourtant des surfaces non-négligeables de nos bandes LiDAR.

	Lidar LGV			Lidar IGN			Total
		Structures			Structures		
	Surface	Proportion	Densité	Surface	Proportion	Densité	
Forêts	22,4 km²	69 %	17,7 / km²	76,8 km²	71 %	15,2 / km² *	15,2 / km² *
Champs	46 km²	17 %	2,3 / km²	18,6 km²	15 %	6,4 / km²	3,5 / km²
Prairies	33,5 km²	14 %	2,3 / km²	17 km²	14 %	6,6 / km²	3,8 / km²
Forêts	23,8 km²	74 %	17,9 / km²	73,4 km²	72 %	16,3 / km² *	19,9 / km² *
Champs	49,5 km²	19 %	2,2 / km²	29,2 km²	27 %	7,3 / km²	3,3 / km²
Prairies	23,8 km²	1 %	0,5 / km²	11,5 km²	1 %	0,7 / km²	0,4 / km²
ND	4,8 km²	6 %					

Tableau 4.1 - Densités des structures établies dans les différents contextes paysagers actuels (Corine Land Cover, 2006) et anciens (Carte de l'Etat Major, 1826-1831). La catégorie ND correspond à des terrains situés dans la région Alsace qui ne sont pas renseignés par la Carte de l'Etat Major.

3.3 Influence du contexte paysager

En Lorraine, les mesures de superficie des mardelles (m²) sont réalisées après une sélection des structures non tronquées par les routes forestières actuelles ou celles localisées en bordure de la fenêtre LiDAR. Un effectif de 550 dépressions non perturbées (sur 580) est alors conservé. Leur localisation dans le contexte paysager actuel influence fortement leurs superficies. Celles en forêts possèdent la superficie la plus faible (moyenne de 373 m² et médiane de 305 m²), assez proche de celles en prairies (moyenne de 428 m² et médiane de 304 m²) mais très inférieures aux structures en champs (moyenne de 732 m² et médiane de 609 m²). Les pratiques agricoles ont provoqué par arasement une augmentation d'un facteur 1,5 de leurs superficies (Fig. 4.7a-d). Si l'on ne considère que les structures n'ayant pas subi de changement de contexte paysager entre la carte de l'Etat Major (1826-1831) et la carte d'occupation actuelle des sols (Corine Land Cover, 2006), la différence de surface entre les structures en forêt (moyenne de 366 m² et médiane de 299 m²) et celles en champs cultivés (moyenne de 854 m² et médiane de 684 m²) depuis au

moins 170 ans, est encore plus grande et alors proche d'un facteur 2,5.

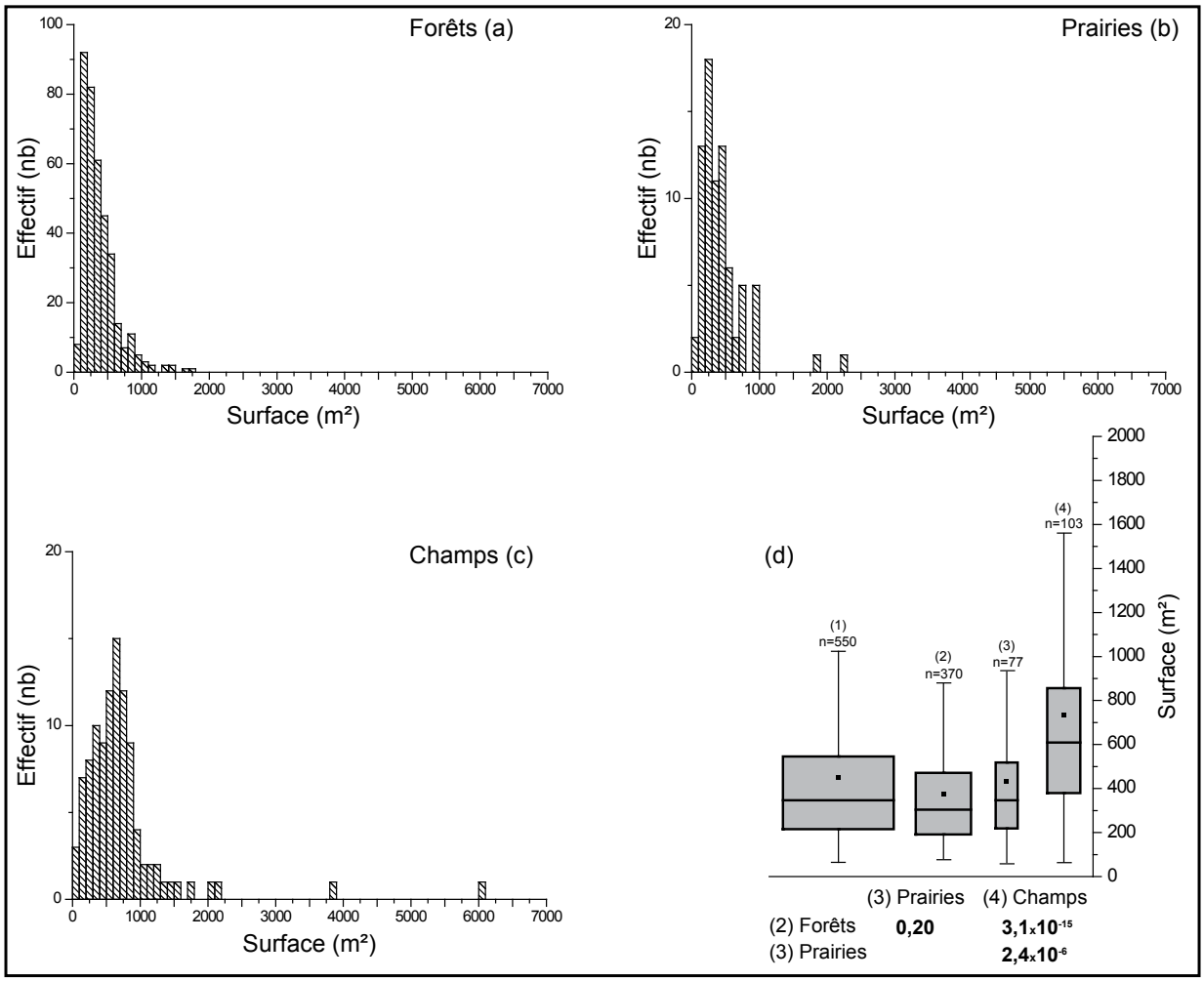


Figure 4.7 - Histogrammes de distribution des superficies des mardelles en forêts (a), en prairies (b) et en champs (c), et représentation à l'aide de boites à moustache (d) de cette distribution. Les valeurs sous les boîtes à moustache correspondent aux résultats des tests de Mann & Whitney sur nos jeux de données.

3.4 Localisation topographique

En Lorraine, les résultats obtenus prouvent une position topographique très majoritairement sur les « sommets » ou hauts de pente, 90% de la distribution étant comprise entre des valeurs de 0 à 1 pour ce rapport Distance crête/Distance fond de vallon. La médiane de distribution à 0,3 confirme une position sommitale très préférentielle (Fig. 4.8).

3.5 Distance entre les structures

Les distances inter-structures sont basées sur la mesure entre le point central d'une structure (centroïde) et celui de la plus proche. Une mesure de bord à bord (polygone à polygone), bien que plus juste, n'est calculable par aucune application automatique connue sous ArcGIS. Toutefois, la différence importante de taille entre nos deux types de structures nécessite la prise en compte de

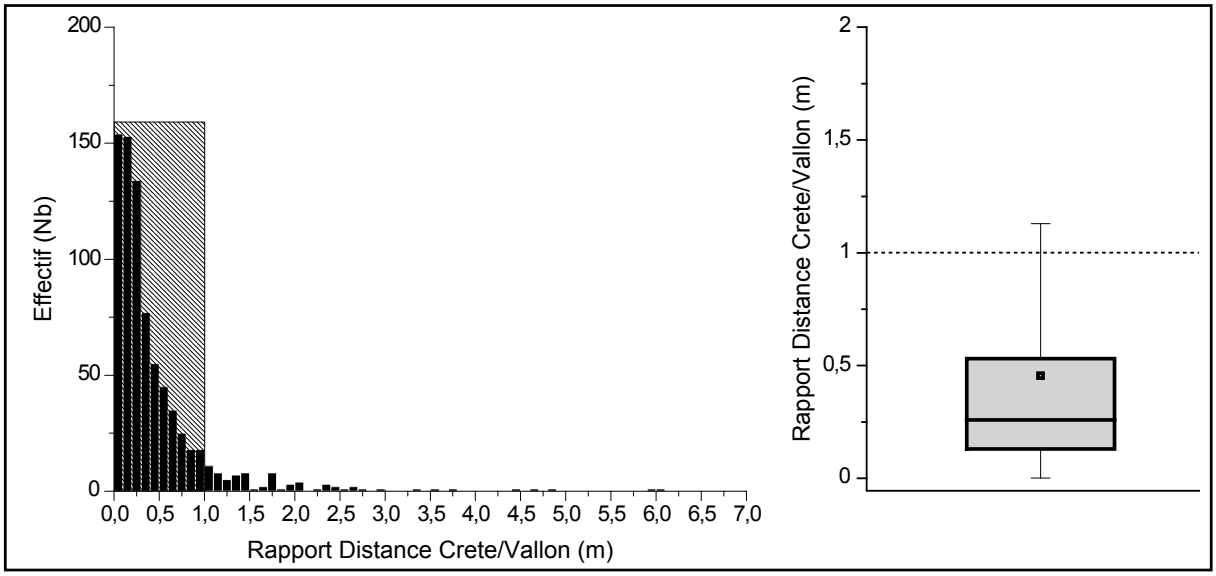


Figure 4.8 - Histogramme et boîte à moustaches de la distribution de la disposition topographique des mares intra-forestières inclues dans la bande LiDAR IGN.

leurs diamètres respectifs. Nous soustrayons donc à la distance mesurée automatiquement entre les centroides, une correction correspondant au rayon de la structure étudiée ajoutée à celui de la plus proche. Ces mesures sont réalisées sur mares intra-forestières, milieu ayant potentiellement le mieux conservé le réseau initial de dépressions.

En Lorraine, la distance entre deux mardelles est alors d'environ 80 m (une moyenne à 94 m et une médiane à 80 m) (Fig. 4.9a). Puisqu'elles sont généralement localisées en position topographique sommitale, nous identifions de nombreux alignements avec un espacement « régulier » selon un axe SO/NE correspondant à l'orientation locale de la topographie (Fig. 4.10a).

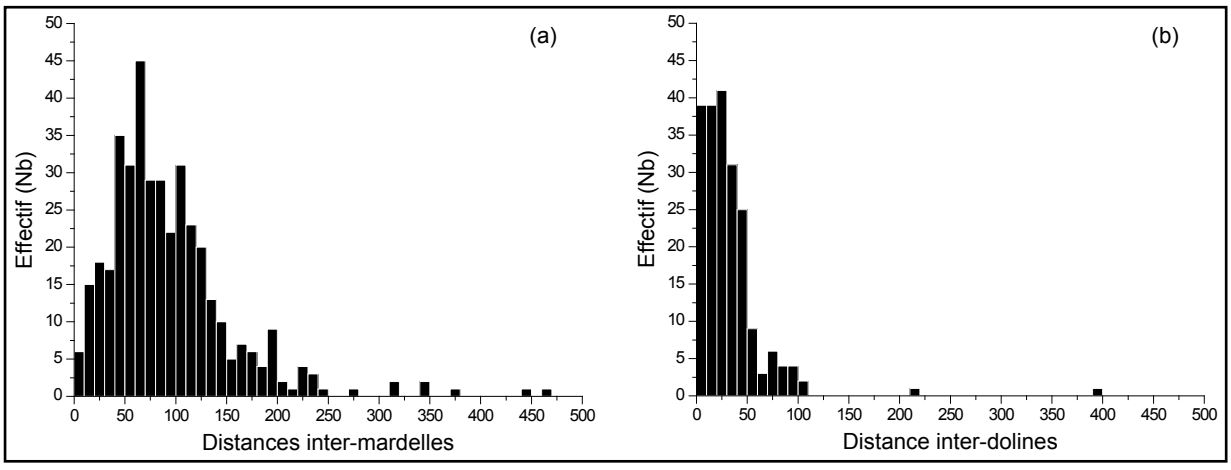


Figure 4.9 - Histogramme de distribution des distances inter-mardelles (a) (Moselle, Lorraine) et des distances inter-dolines (b) (Doubs, Franch-Comté).

En Franche-Comté, ces distances sont beaucoup plus faibles (une moyenne à 35 m et une médiane à 24 m) (Fig. 4.9b) et plus 5% de ces dolines sont accolés les unes aux autres, le long de ce qui pourrait correspondre à des zones de faille où se forment une partie de ces dolines (Fig. 4.10b).

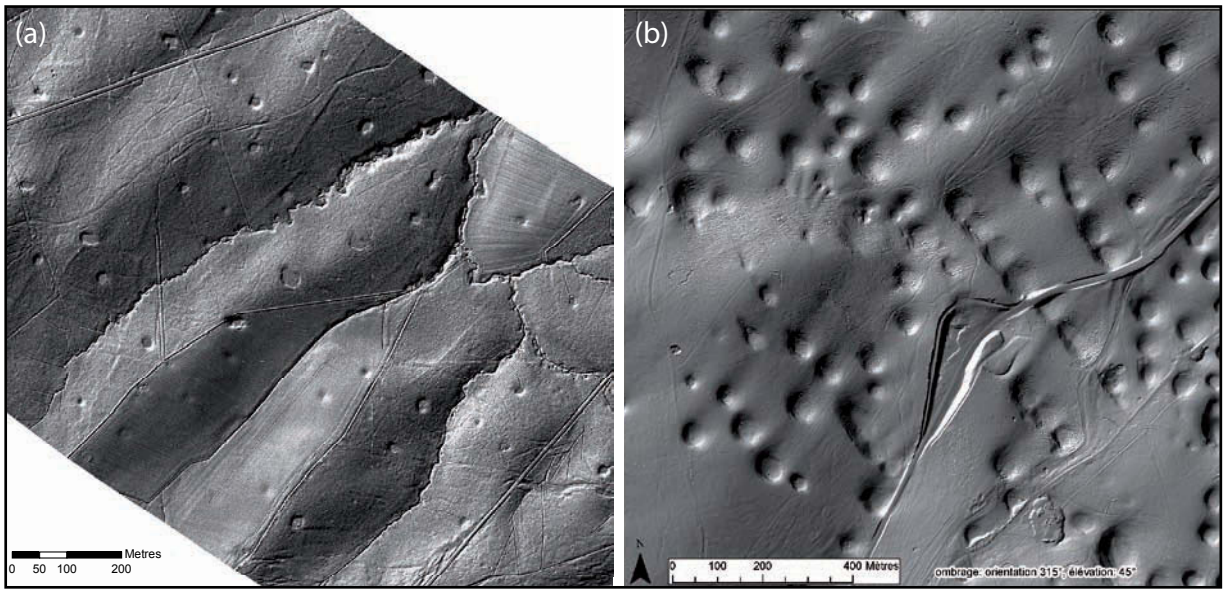


Figure 4.10 - Imageries LiDAR (ombrage 315°, élévation 45°) des mardelles en Lorraine (a) et des dolines en Franche-Comté (b) illustrant les alignements topographiques identifiés.

3.6 Les différents contextes géologiques en Lorraine

Le premier point remarquable est la présence de structures sur tous les types de contextes géologiques (grès, calcaires, dolomies et marnes). Quel que soit le substrat géologique, la densité en contexte forestier y est toujours plus importante (Tab. 4.2).

Certains contextes géologiques sont plus « riches » tel que les marnes irisées du Keuper inférieur (20,7 par km² ; 29,7 par km² en forêt), le calcaire du Muschelkalk (7,3 par km² ; 15 par km² en forêt) ou plus « pauvres » tels que le calcaire du Lias (6,4 par km² ; 10,7 par km² en forêt), les marnes à dolomie du Keuper supérieur (3,2 par km² ; 7,3 par km² en forêt), le grès du Rhétien (3,6 par km² ; 5 par km² en forêt) et le grès du Trias (0,8 par km² ; 1,8 par km² en forêt). Sur la zone de la bande IGN, en affectant la correction de facteur 2, nous obtenons également des densités plus élevées sur les marnes irisées du Keuper inférieur (13,2 par km² ; 17,6 par km² en forêts) que sur les marnes à dolomites du Keuper supérieur (2,6 par km² ; 0,5 par km² en forêts). Les densités obtenues sur les deux bandes LiDAR sont très proches pour le même contexte géologique du Keuper supérieur (LGV/ 3,2 par km² ; IGN/ 2,6 par km²) mais différentes pour le Keuper inférieur (LGV/ 20,7 par km² ; IGN/ 13,2 par km²).

Ces différences de « richesses » en mardelles selon les substrats géologiques, principalement sur les terrains du Keuper inférieur, sont notées depuis les premières travaux sur ces structures en Lorraine (Wichmann, 1903 ; Grenier, 1906). L'observation d'une densité plus forte sur les marnes du Keuper inférieur est utilisé comme le principal argument afin d'étayer l'hypothèse de leur origine naturelle (Deffontaines & Guyot, 1932 ; Delafosse, 1948) en liant directement

cette « localisation préférentielle » sur ce socle géologique à une formation par des phénomènes géologiques de dissolution potentiellement existant sur ces substrats. Toutefois, ce type de corrélation peut également être expliquée par une extraction anthropique d'un matériau spécifique (marne, calcaire) sur le socle géologique qui potentiellement le contient, ainsi une corrélation directe entre densité de structure, géologie et origine naturelle semble abusive.

	Lidar LGV			Lidar IGN		
	Forêts	Prairies	Champs	Forêts	Prairies	Champs
	1,8 / km²	0,5 / km²	0 / km²			
	5 / km²	3,8 / km²	2 / km²			
	15 / km²	2,4 / km²	4,5 / km²			
	7,3 / km²	1,2 / km²	1,2 / km²	0,5 / km²	4,6 / km²	2,9 / km²
	29,7 / km²	19,8 / km²	12,6 / km²	17,6 / km²	11,4 / km²	10,7 / km²
	10,7 / km²	3 / km²	5,4 / km²			

Tableau 4.2 - Densités des mardelles selon leurs implantations sur les différents socles géologiques sur les bandes LiDAR IGN et LGV en Lorraine suivant leur contexte paysager actuel (Corinne Land Cover, 2006) et ancien (1826-1831).

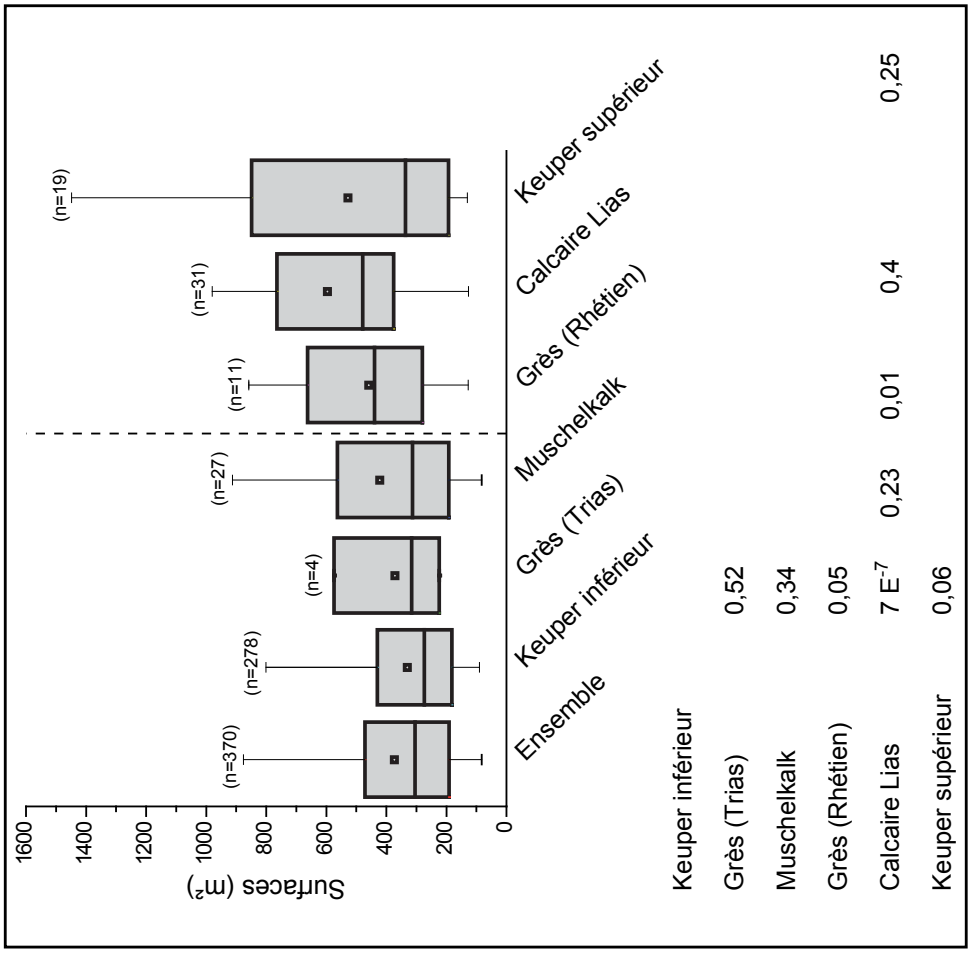
3.6.1 Influence du contexte géologique sur les superficies

Puisque nous avons des structures sur tous les types de substrats géologiques, il est intéressant de voir si les normes métriques définies ci-dessus peuvent être systématisées. Pour ces mesures nous ne conservons que les structures intra-forestières mais en différenciant leur contexte géologique d'implantation. Malheureusement, l'échantillonnage est alors très faible sur la plupart des contextes géologiques et particulièrement sur les grès (Trias et Rhétien) et sur les marnes à dolomie du Keuper supérieur.

Les tests statistiques de Mann et Whitney et la représentation des données en box-plot peuvent suggérer une différence de superficies entre celles implantées sur les calcaires du Lias (n=31), et potentiellement celles sur les marnes à dolomie du Keuper supérieur (n=19) et les grès du Rhétien (n=11) opposés aux structures sur les marnes irisées du Keuper inférieur (n=278), sur le calcaire du Muschelkalk (n=27) et sur les grès du Trias (n=4) (Fig. 4.11).

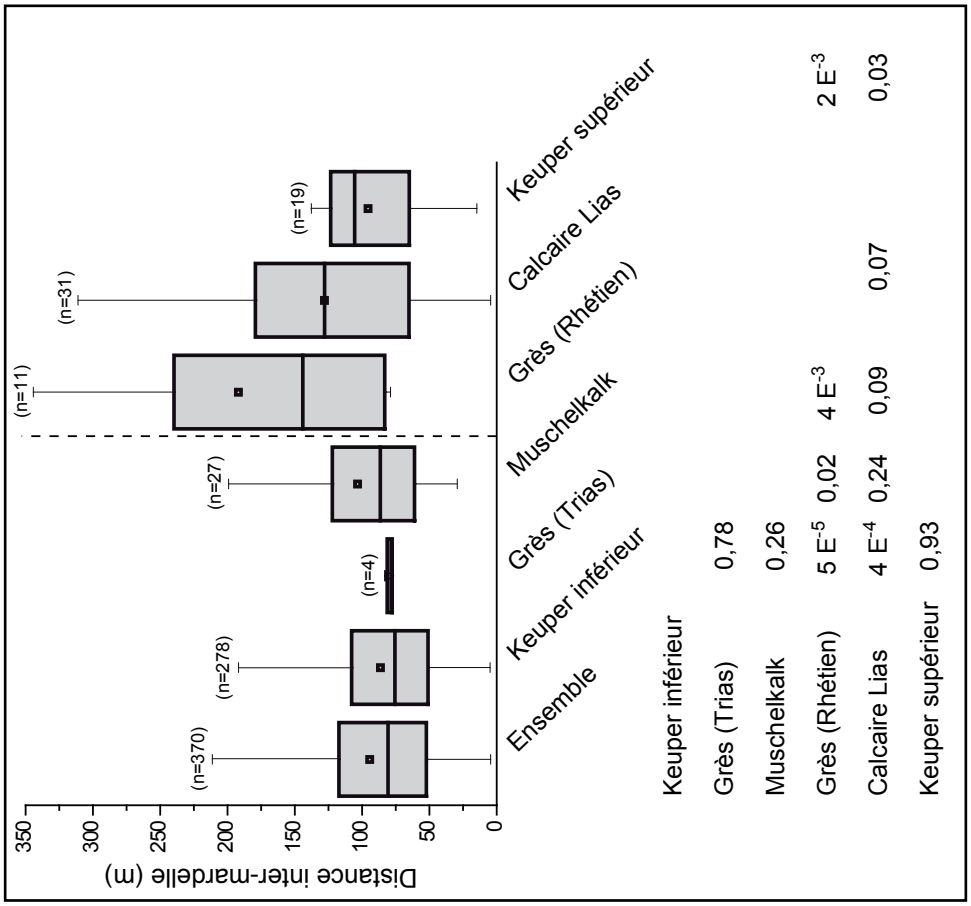
3.6.2 Influence du contexte géologique sur les distances inter-mardelles

Les distances inter-mardelles sont également testées pour les différents contextes géologiques, sur le même échantillonage que précédemment. Celui-ci est toujours très faible mais les tests statistiques différencient également pour ce paramètre les dépressions sur les grès du Trias, le calcaire du Muschelkalk et les marnes irisées du Keuper inférieur opposés aux structures



	Keuper inférieur	Grès (Trias)	Muschelkalk	Grès (Rhétien)	Calcaire Lias	Keuper supérieur
Keuper inférieur		0,52	0,34	0,05	$7\ E^{-7}$	0,06
Grès (Trias)					0,23	
Muschelkalk					0,01	
Grès (Rhétien)					0,4	
Calcaire Lias						0,25
Keuper supérieur						

Figure 4.11 - Box-plots des superficies des mares actuellement en contexte forestier selon les substrats géologiques. Les tests de Mann & Whitney dissocient deux groupes formés par les mares sur Keuper inférieur, sur Grès du Trias et sur Muschelkalk opposés aux mares sur Grès du Rhétien, sur Calcaire du Lias et sur Keuper supérieur.



	Keuper inférieur	Grès (Trias)	Muschelkalk	Grès (Rhétien)	Calcaire Lias	Keuper supérieur
Keuper inférieur		0,78	0,26	$5\ E^{-5}$	$4\ E^{-4}$	0,93
Grès (Trias)				0,02	0,24	
Muschelkalk				$4\ E^{-3}$	0,09	
Grès (Rhétien)					0,07	$2\ E^{-3}$
Calcaire Lias						0,03
Keuper supérieur						

Figure 4.12 - Box-plots des distances inter-mardelles des structures actuellement en forêts selon les substrats géologiques. Les tests de Mann & Whitney dissocient deux groupes formés par les mares sur Keuper inférieur, sur Grès du Trias et sur Muschelkalk opposé aux mares sur Grès du Rhétien, sur Calcaire du Lias et sur Keuper supérieur.

implantées sur le calcaire du Lias et le grès du Rhétien (Fig. 4.12).

3.7 Contexte archéologique

Les études palynologiques et les études morphologiques des mardelles intra-forestières suggèrent une origine anthropique et une implantation agro-pastorale autour de celles-ci dès leur formation (*cf. Chapitre 3*). La qualité des images obtenues par la prospection LiDAR sur la zone LGV offre la possibilité d'identifier des structures archéologiques existantes au sein de ces forêts généralement peu prospectées (*cf. Chapitre 2*). Des parcellaires agraires anciens peuvent être conservés et identifiés en forêt grâce à l'utilisation de la technique LiDAR même 1500 ans après leur abandon (Georges-Leroy *et al.*, 2009). Généralement, ces parcellaires sont des empierrements mais ils peuvent également correspondre à d'anciennes haies perceptibles sur le terrain sous la forme d'une petite élévation mais très difficilement identifiable sans l'aide des données altimétriques obtenues par la tédétection LiDAR.

3.7.1 Parcellaires agraires

De nombreux linéaires de ces parcellaires sont identifiés sur la bande LiDAR LGV et plus particulièrement dans trois massifs forestiers (Fig. 4.13) ; la forêt du Fallberg (grès du Trias), la forêt domaniale de Fénétrange (marnes irisées du Keuper inférieur) et la forêt du Bois Sollin (calcaire du Lias).

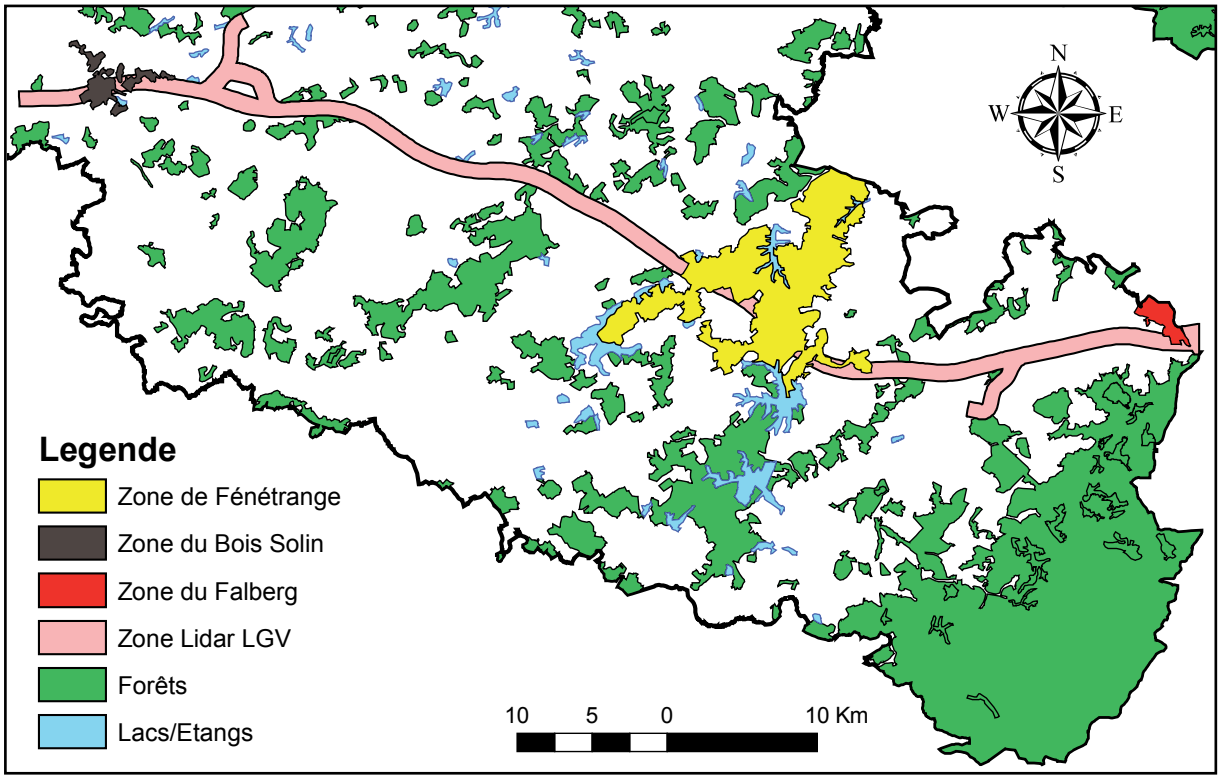


Figure 4.13 - Carte de localisation des massifs forestiers du Bois Sollin, de Fénétrange et du Fallberg traversés par la bande Lidar LGV et présentant les densités de linéaires de parcellaires les plus importantes.

On retrouve la majorité de ces linéaires de parcellaires dans les forêts développées sur les terrains marneux du Keuper inférieur (Domaniale de Fénétrange) et abritant d'ailleurs les plus fortes densités de mardelles.

Cependant, la conservation de ces parcellaires n'est pas optimale puisqu'ils ne sont pas empierrés et le réseau que l'on relève grâce aux images LiDAR est très fragmenté et non exhaustif.

Tout d'abord, nous nous intéressons à la disposition spatiale des structures au sein du parcellaire. Comme l'on peut le voir sur la zone de Fénétrange (Fig. 4.14), la grande majorité d'entre elles pouvant être rattachées à un parcellaire sont disposées en bordure de celui-ci. Si l'on compare avec les deux autres zones, il existe alors des différences notables avec une disposition plus « anarchique » des mares au Bois Sollin (Fig. 4.15) et au Fallberg (Fig. 4.16).

4. Discussions

4.1 Définition physique de l'objet « mardelle »

L'utilisation des données LiDAR (LGV et IGN) confère une réalité métrique aux structures que nous étudions. Les densités observées en contexte forestier sont les plus importantes et leurs paramètres initiaux (taille, profondeur, dispersion) y sont les mieux conservés. En effet, la stabilité des massifs forestiers depuis au moins le début du 19ème siècle dans notre zone d'étude a protégé les structures des effets des pratiques agro-pastorales (comblement, arasement) et particulièrement de la mécanisation de l'agriculture.

Ainsi une mardelle correspond à un phénomène géomorphologique d'une taille entre 10 et 30 m de diamètre. Leur profondeur, non renseignée par le LiDAR, est généralement de 3 m mais quelques rares structures peuvent atteindre les 5 m de profondeur (Grenier, 1906 ; Barth *et al.*, 2001). Leur disposition topographique est très préférentiellement sommitale ou en haut de pente et très rarement en fond de vallons. Elles peuvent être « alignées » sur ces sommets topographiques. La distance inter-mardelle moyenne est d'environ 80 m.

Nos résultats sont en parfaite adéquation avec les travaux pionniers de Wichmann (1903), basé sur un inventaire de 5000 structures dans le département de la Moselle, des auteurs du début du siècle (Grenier, 1906), et de Barth *et al.* (2001). Peu d'autres inventaires sont disponibles dans la littérature. Gillijns *et al.* (2005) et Vanwalleghem *et al.* (2006b) en forêt de Merdaal (Leuven, Belgique) décrivant des structures aux dimensions très proches (28,8 m de diamètre en moyenne) et une disposition topographique sommitale identique à la notre.

Malheureusement la quasi totalité des datations radiocarbone et des études sédimentaires ainsi que la majorité des massifs forestiers prospectés sur nos bandes LiDAR (LGV et IGN) sont implantées sur les terrains du Keuper inférieur. La carte de visite que nous dessinons n'est donc valable pour les structures sur ce contexte géologique même si nos travaux démontrent qu'elle

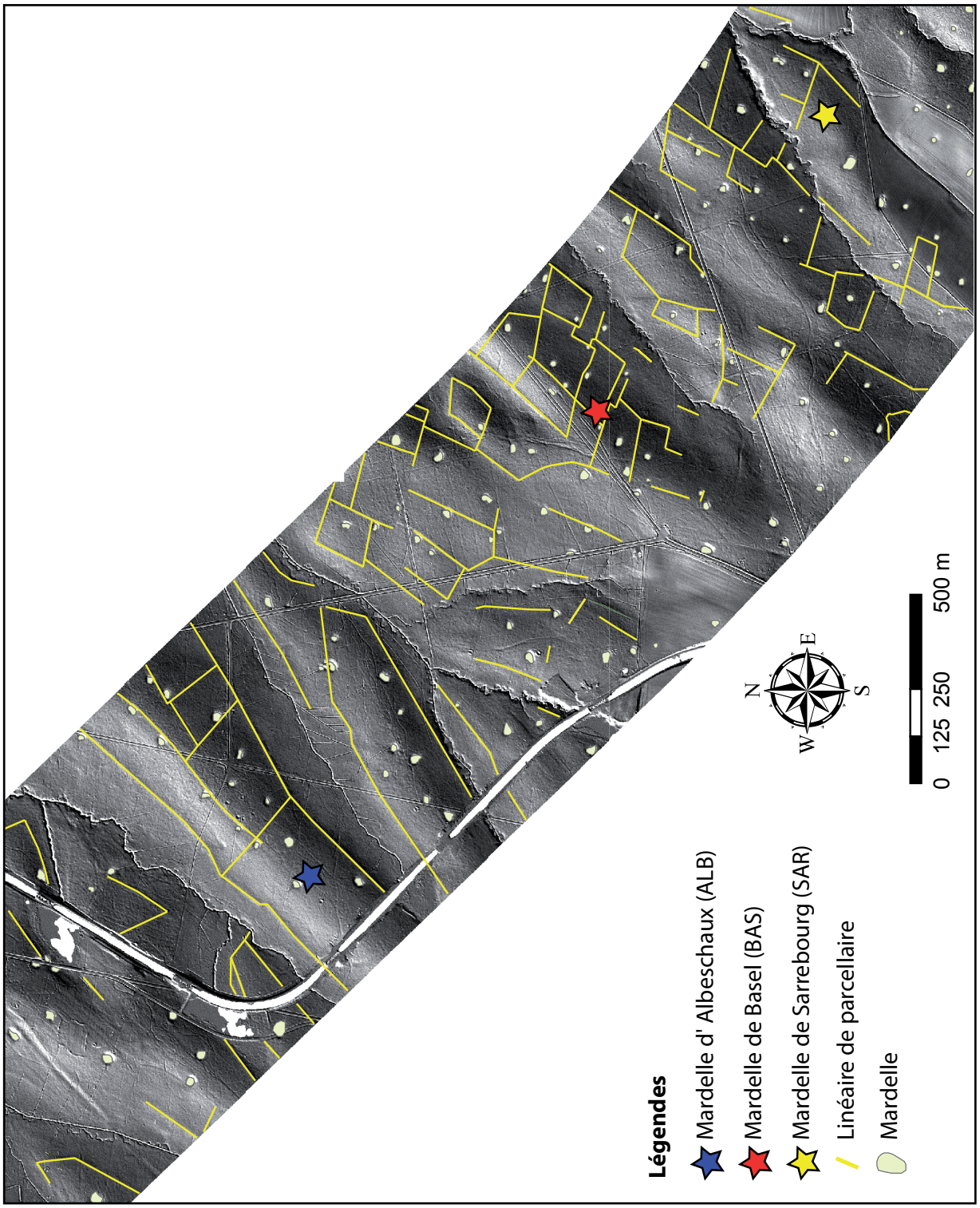


Figure 4.14 - Imageries LIDAR de la zone LGV (ombrage 315°, élévation 10°) et plus particulièrement de la forêt Domaniale de Fénétrange (bois du Fort Buisson). Les mardelles et les tallus rectilignes des parcellaires sont soulignées. Les mardelles d'Albeschaux (ALB), de Basel (BAS) et de Sarrebourg (SAR) sont implantées dans ce parcellaire ancien et l'étude de leur remplissage sédimentaire est décrit dans le *Chapitre 4* de ce manuscrit.

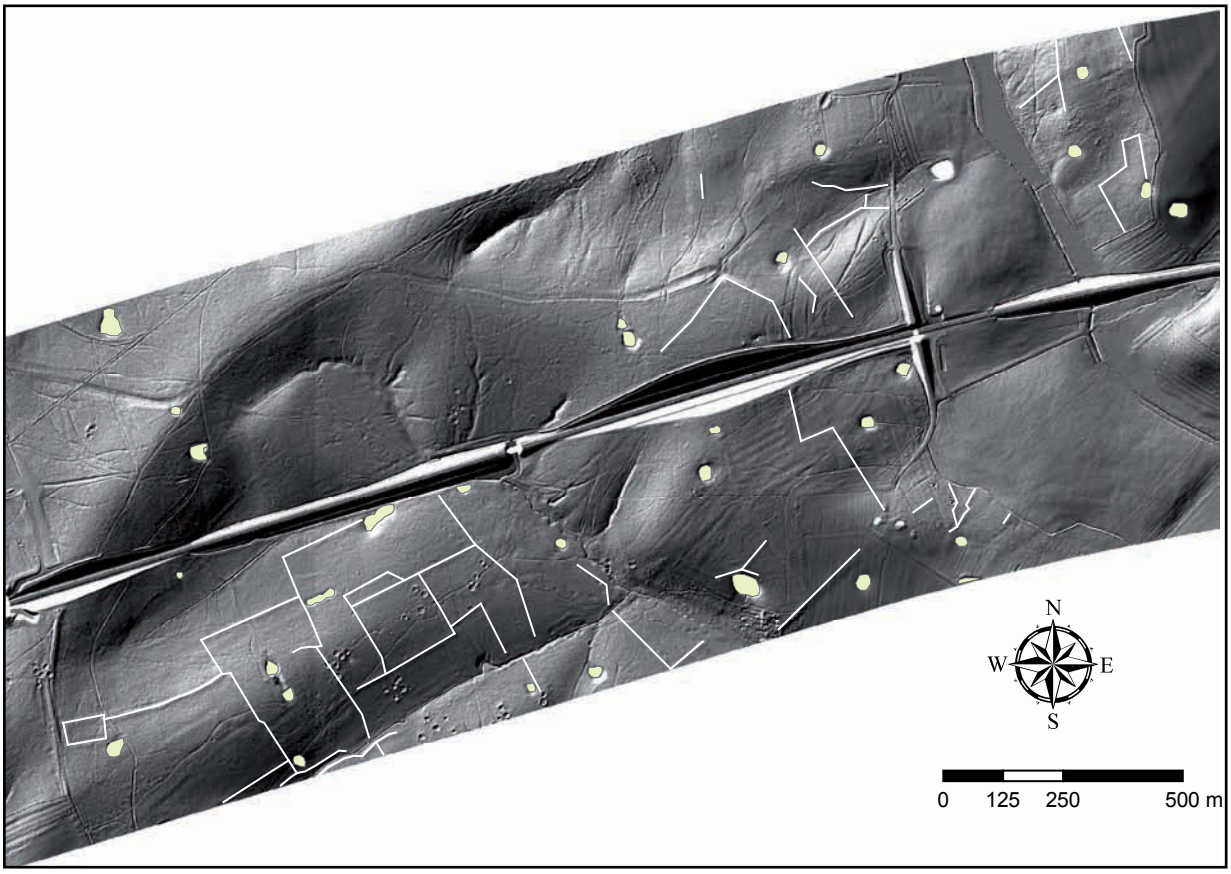


Figure 4.15 - Imageries LIDAR de la zone LGV (ombrage 315°, élévation 10°) et plus particulièrement de la forêt du Bois Sollin sur calcaire du Lias. Les tallus rectilignes du parcellaire et les mardelles sont soulignées.

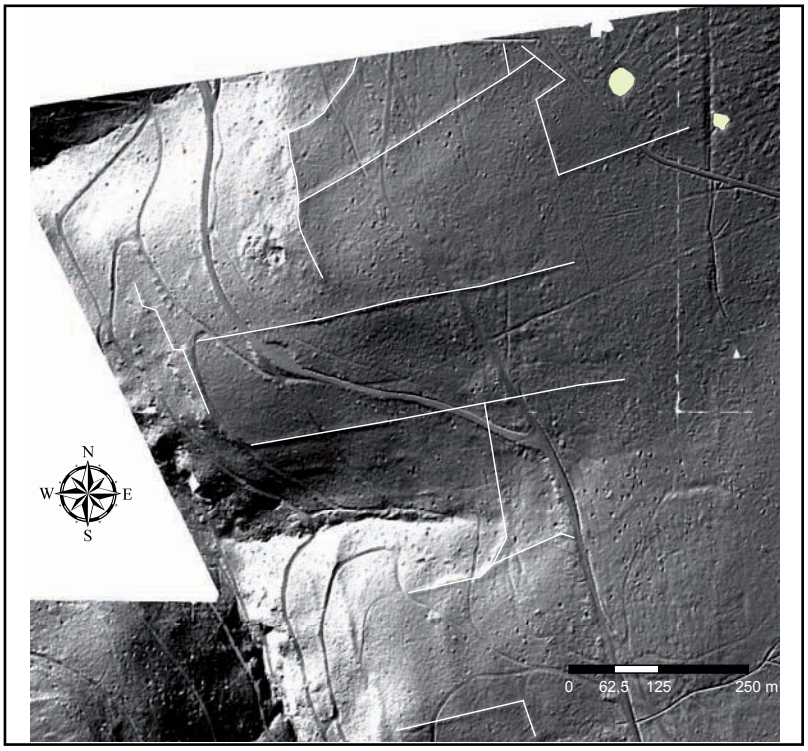


Figure 4.16 - Imageries LIDAR de la zone LGV (ombrage 315°, élévation 10°) et plus particulièrement de la forêt du Fallberg sur grès du Rhétien. Les tallus rectilignes du parcellaire et les mardelles sont soulignées.

est également applicable aux structures sur le calcaire du Muschelkalk et sur les grès du Trias.

4.2 Les dépressions fermées sur les autres contextes géologiques, des mardelles ?

Dans la littérature du début du 20ème siècle, les mardelles sont clairement différenciées des « trous de loups » (dolines) identifiés comme des phénomènes différents et surtout ne posant pas de question sur leur origine. La différence entre « doline » et « mardelle » est d'ailleurs confirmée par le travail de S. Jaillet (2005) sur le karst Barrois (Meuse) dans l'ouest de la Lorraine. Selon S. Jaillet (2005), les mardelles sont localisées sur « un replat sommital » sur les argiles grises compactes et plastiques de l'Aptien inférieur recouvertes de limons de plateau. Contrairement aux dolines, les mardelles présentent « *une profondeur moindre* […], *une densité bien inférieure* […] *et ne se présentent pas en alignement de contact* » (Fig. 4.1è).

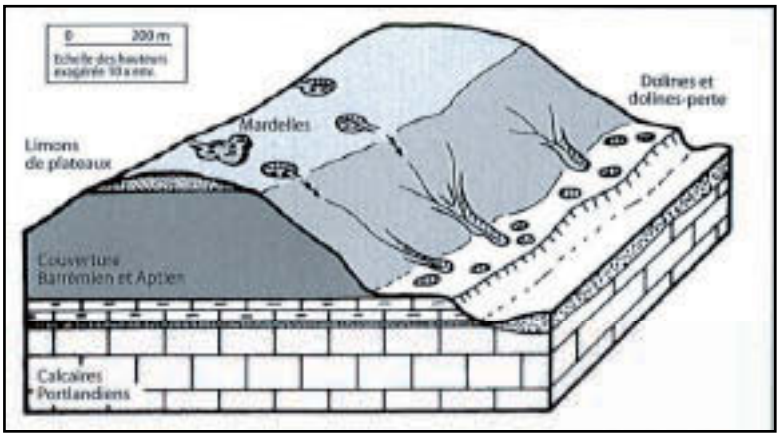


Figure 4.17 - Bloc diagramme schématique montrant l'association des mardelles en position sommitale et des dolines en pied de versant en Woëvre (Meuse, Lorraine). Figure extraite de S. Jaillet (2005).

Selon les tests statistiques que nous avons réalisé pour les différents paramètres mesurés (taille, distance inter-mardelle), il semble que deux groupes se séparent selon les contextes géologiques : avec d'un coté les structures sur les grès du Trias, sur le calcaire du Muschelkalk et sur les marnes irisées du Keuper inférieur opposées aux structures sur les marnes à dolomies du Keuper supérieur et sur les calcaires du Lias.

Ces différences sont également pointées par Goepp (2010) qui a étudié des structures sur le calcaire du Lias lors des fouilles LGV en 2009 et par exemple sur deux d'entre-elles (Lucy11 et Lucy18) qui ont été fouillées. Elles sont de très grande taille (8850 m² et 5300 m²) et de profondeurs importantes (470 cm et 390 cm) par rapport aux valeurs métriques décrits précédemment. Leur sédimentation est organique à la base (Lucy 18) ou pas (Lucy11). Finalement, les datations radiocarbone effectuées sur des fragments de bois (Lucy 18, 250 à 290 cm) et de tourbe (Lucy 11, 340 à 390 cm) démontre une formation de ces dépressions autour de 4500 BP à Lucy 11 (4500 ± 35 BP, [3355-3040] cal. BP) ou plus ancienne pour la structure Lucy 18 (4480 ± 40

BP, [3348-3026] cal. BP) car la datation ne correspond pas au début de sédimentation (à 470 cm). Ces structures présentent des caractéristiques métriques et géomorphologiques, plongement latéral des couches et profil en V (Goepp, 2010), très différentes des structures que nous avons étudiées en contexte forestier sur les marnes du Keuper inféreiur, et s'avèrent s'être formées à des périodes beaucoup plus anciennes, certainement par un processus naturel.

4.3 Relation au contexte archéologique

4.3.1 Datation du parcellaire

Certains contextes géologiques sont plus riches en mardelles, principalement les marnes irisées du Keuper inférieur où les imageries LiDAR dévoilent un grand nombre de linéaires de parcellaires agraires anciens malheureusement non datables directement au C^{14} du fait de l'absence de matériel carboné. Toutefois les études palynologiques, les données archéologiques et les cartes anciennes sont des indices permettant d'en proposer une datation indirecte en travaillant de façon régressive.

Les cartes d'Etat Major (1826-1831) mais également la carte de Cassini (1756-1789) et la carte des Naudins (1728-1739) démontre la présence de grands massifs forestiers sur cette zone de parcellaire. Ils ne sont donc en aucun cas datés de l'époque moderne.

Pour les périodes antérieures, nous pouvons nous référer à des documents iconographiques et textuels provenant des archives historiques locales et rassemblées par C. Zeller (2011). Ces sources historiques démonternt que ces bois appartiennent au 17ème siècle à l'abbaye de Saint-Jean de Bassel. Les séquences palynologiques de Sarreboug, d'Albeschaux et de façon plus distante celle de Bisping, présentées plus largement dans la suite de ce manuscrit (*cf. Chapitre 5 et Chapitre 6*) sont inclues dans ces parcellaires et montrent l'absence d'importants défrichements et d'indices d'anthropisation au cours de la période médiévale.

La séquence pollinique de Sarrebourg et de Bisping, les seules dans cette zone couvrant la période Romaine et celle du second âge du Fer, décrivent cette fois un paysage très ouvert marqué par des pratiques agro-pastorales. Les données de la carte archéologique (Flotté & Fuchs, 2004) citent la découverte de plusieurs incinérations Gallo-romaines à 300 m à l'est (Alzing) de la mardelle de Sarrebourg (SAR). Lors des fouilles archéologiques le long du tracé LGV, plusieurs incinérations Gallo-romaines (Domaniale d'Albestroff) et un petit établissement rural Gallo-romain au lieu dit le *Haut du Chaufour*, ont également été découverts (Viller, communication personnelle).

Ainsi ces parcellaires agraires semblent pouvoir être datés de la période de l'âge du Fer ou de la période Romaine et seraient donc contemporains de la création de ces mardelles. En Belgique, des analyses spatiales démontrent statistiquement une probabilité plus élevée de trouver une « mardelle », dont l'origine anthropique est également étayée (Vanwalleghem *et al.*, 2006b), à

côté de sites archéologiques préhistoriques et d'époque Romaine (Vanwalleghem *et al.*, 2008).

La datation des linéaires de parcellaires identifiés grâce aux prospection LiDAR dans les forêts du Bois Sollin (*cf. Fig. 4.15*) et de la forêt du Fallberg (*cf. Fig. 4.16*) ne sont pas datés. Nous ne savons pas non plus si s'agit d'anciennes haies ou s'il s'agit d'empierrements. Toutefois, dans le Bois Sollin, au lieu dit *Bois du Haut du chèvre*, un petit établissement gallo-romain a été fouillé en 2002 par l'INRAP (responsable Feller) lors de l'opération LGV phase 1. Pour le site du Fallberg, Goubet & Meyer (2005) citent également la présence d'un habitat gallo-romain à la limite de la zone LiDAR ici prospectée.

4.3.2 Disposition au sein du parcellaire

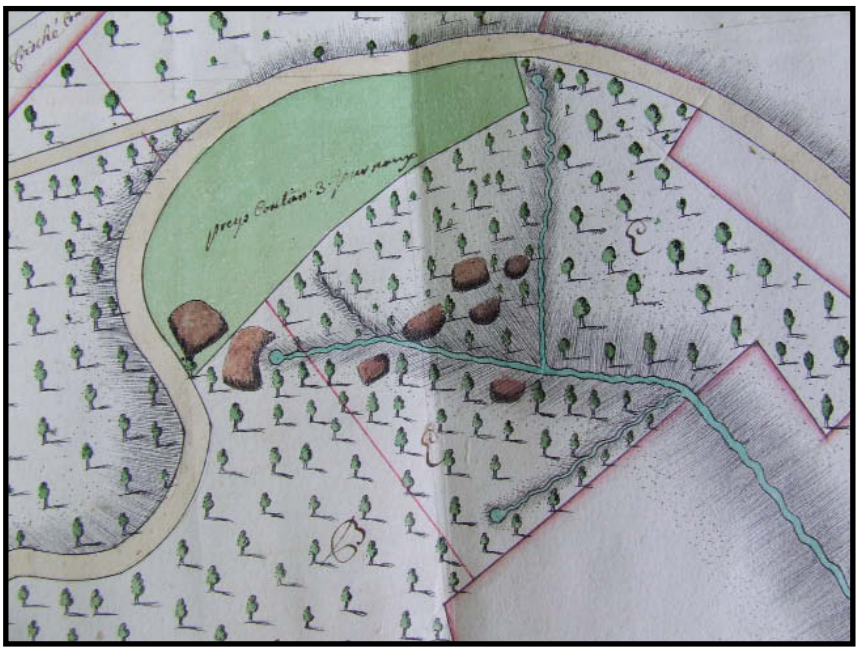
Le but du creusement de ces mares est toujours en question mais l'implantation de celles-ci dans un système de parcellaire laisse envisager une relation entre ces deux entités.
Le creusement de ces dépressions pour l'exploitation de la marne sous-jacente puis un marnage des champs/prairies est préférentielle sur les reliefs. La disposition de ces mardelles, en position de bord amont des tallus du parcellaire est assez logique dans le but d'un épandage futur du matériel excavé sur la surface à valoriser.
Néanmois, le marnage est peu valorisé sur les bas de pente ou l'épaisseur de limon est faible. Or on trouve un proportion faible mais néanmoins significative de mardelles en bas de pente avec de faibles épaisseurs de limons. Le creusement afin de marner les sols ne peut alors être l'unique origine. L'abreuvoir pour bétail apparait ainsi comme un but vraisemblable.

Chapitre 5

Histoire des forêts anciennes du Plateau lorrain

Une partie des données disponibles dans ce chapitre ont fait l'objet d'une publication dans la revue *Quaternaire* :

> **David Etienne**, Pascale Ruffaldi, Frédéric Ritz & Etienne Dambrine, 2010. Etude des variations de la végétation d'un massif forestier de la plaine lorraine (Moselle, France) depuis le Moyen Age. *Quaternaire* **21**, **(1)**, 317-323.



Document de couverture du chapitre

Photographie d’un plan d’un canton nommé Albeshau appartenant à l’abbaye de Vergaville, illustrant des mardelles drainées et, à côté, des tas de terres. Cliché et recherche dans les archives par Catherine Zeller.

1. Introduction

En Europe de l'Ouest, une forêt sur deux s'est développée sur d'anciennes prairies ou cultures au cours du 19ème siècle ou au début du 20ème siècle (Mather *et al.*, 1998 ; Bellemare *et al.*, 2002). Ces forêts « récentes » sont différenciées des forêts « anciennes » par comparaison avec les fonds cartographiques anciens disponibles dans chaque pays (Peterken & Game, 1984). Mais des études archéologiques récentes utilisant la méthode de prospection LiDAR (Light Detection And Ranging) démontrent que certaines de ces forêts « anciennes » furent défrichées et cultivées pendant le Moyen Age ou la période Romaine (Sittler, 2004 ; Georges-Leroy *et al.*, 2008, 2009 ; Crutchley, 2006, 2009). De plus, des travaux d'écologie historique démontrent que des pratiques agricoles anciennes, pouvant dater de deux millénaires, influencent encore aujourd'hui la biodiversité floristique et les propriétés chimiques de ces sols (Koerner *et al.*, 1997 ; Hermy *et al.*, 1999 ; Dupouey *et al.*, 2002a, 2002b ; Jussy *et al.*, 2002 ; Dambrine *et al.*, 2007).

Les dépressions fermées du Plateau lorrain renferment des archives sédimentaires offrant un enregistrement continu et à haute résolution temporelle des changements d'usages de sols forestiers et permettraient de retracer l'histoire de ces forêts « anciennes ». Ces petits capteurs, implantés sous canopée, captent et enregistrent une image pollinique provenant majoritairement de la végétation environnante (Chen, 1988 ; Sugita, 1994 ; Calcotte, 1995, 1998). Afin de saisir dans ses diversités la dynamique régionale d'anthropisation, il est toutefois nécessaire de préciser l'origine géographique des pollens collectés par ces petites structures, et de comparer les résultats palynologiques obtenus sur de nombreux sites afin d'en extraire les grandes tendances évolutives. Pour cela, les palynologues utilisent de plus en plus les analyses statistiques multivariées (ACP, AFC) (Birks *et al.*, 1996 ; Kerig & Lechterbeck, 2004 ; Lechterbek *et al.*, 2009). Ces méthodes statistiques sont sans *a priori* sur la valeur indicatrice de tel ou tel taxon et utilisent tous les grains de pollen comptabilisés, même ceux généralement exclus dans les calculs de pourcentages polliniques (comme par exemple les pollens de plantes aquatiques et les spores).

Dans ce chapitre, nous présenterons (1) des résultats d'échantillons de pluie pollinique actuelle réalisés le long d'un transect traversant un petit massif forestier, ceci afin de confronter la réalité de la composition des peuplements sylvicoles actuels avec les spectres polliniques enregistrés, ainsi que l'influence de la distance à la lisère agricole ; (2) les résultats des analyses polliniques de cinq enregistrements sédimentaires de mardelles ; (3) les résultats d'une Analyse en Composante Principale de ces données polliniques, et finalement (4) nous confronterons les dynamiques d'anthropisation révélées par les analyses polliniques des mardelles avec la séquence pollinique d'un autre type de capteur sédimentaire, le bas-marais de Francaltroff.

2. Résultats et interprétations

Les recherches palynologiques se sont longtemps focalisées sur les dynamiques de végétation tardiglaciaire et holocène en lien avec les oscillations climatiques passées (Gaillard, 1984 ; Ruffaldi, 1993 ; Leroyer, 1997 ; Bégeot, 2000). Ainsi jusqu'au début de l'Holocène (*Early mid-Holocene*), la distribution, la composition et la dynamique végétale sont principalement influencées par des forçages climatiques globaux. Le développement de l'agriculture au Néolithique entraina les premiers impacts de l'homme sur la dynamique naturelle des écosystèmes continentaux par des défrichements sporadiques et la mise en culture de certains plantes (Puertas, 1999 ; Ruffaldi, 1999 ; Richard, 2004).

Progressivement, l'expansion des sociétés humaines et l'amélioration des techniques agraires perturbent l'évolution naturelle des écosystèmes (Richard, 1994). Les études paléoécologiques tentent alors d'identifier et de caractériser les étapes chronologiques de l'anthropisation des milieux naturels. Pour cela, elles se basent sur le pourcentage de pollen arboréens (Arborean Pollen/Total Land Pollen) en tant qu'indicateur de l'ouverture de l'espace (Heim, 1970), et des indices paléobotaniques (Indicateurs Polliniques d'Anthropisation, IPA) liés directement ou indirectement aux différentes pratiques agro-pastorales (Behre 1981, 1986, 1988).

Cependant cette approche se heurte à de plusieurs limites méthodologiques. La relation entre pourcentages de NAP (Non Arboreal Pollen) et l'ouverture du paysage n'est pas linéaire (Broström *et al.*, 1998 ; Sugita *et al.*, 1999). Plusieurs facteurs peuvent l'influencer tels que l'existence de patchs de végétation, leur distribution dans le paysage, la production pollinique de chaque espèce et leur dispersion, ...

Nous avons donc utilisés les méthodes d'analyses multivariées (ACP) et l'étude des analogues actuels (pluie pollinique actuelle) afin de calibrer et de mieux caractériser notre signal pollinique. Ceci afin de comprendre dans quels contextes paysagers (forêt, lisière, milieu ouvert) et d'anthropisation (agriculture, pastoralisme, ...), nos mardelles ont évoluées au cours des deux derniers millénaires.

2.1 Analyse en Composante Principale (ACP)

La description de la méthode, le nombre d'échantillons et les séquences inclues dans le calcul des facteurs de l'ACP sont précisés dans le *Chapitre 2*.

L'analyse différencie deux axes factoriels expliquant 7% (axe 1) et 4,9% (axe 2) de la variance de nos données. Ces pourcentages sont faibles, mais plutôt classiques pour des données avec un grand nombre de variables (110 taxons) et de nombreuses valeurs nulles (73%). L'examen de la nature des taxons responsables de la formation de chacun de ces deux axes (Tab. 5.1) permet

d'en donner une interprétation écologique.

(1) le premier axe est représenté dans les valeurs positives par des plantes cultivées (*Cerealia*-type, *Cannabis/Humulus*, *Secale*-type), des adventices des champs (*Papaver*), des herbacées (*Rumex acetosa/acetosella,* Poaceae et Anthemideae), des rudérales (Chenopodiaceae), des arbres cultivés (*Juglans*) et opposés à des taxons arboréens mésophiles (*Fraxinus*, *Carpinus, Acer, Fagus*, *Abies*) et d'arbres hygrophiles (*Alnus, Salix*) (Tab. 5.1a)

(2) le second axe est représenté dans les valeurs positives par des taxons polliniques de pâtures (*Plantago lanceolata*, *Plantago major/media*, Apiaceae, Poaceae, Cichoiroideae, *Polygonum bistorta*, Lamiaceae type *Mentha*, *Centaurea jaceae/nigra*) et des plantes aquatiques et méso-hygrophiles (*Myriophyllum*, *Alisma plantago-aquatica*) opposées à des taxons arboréens mésophiles (*Carpinus, Corylus* et *Fagus*), des arbres pionniers (*Betula*) et des hygrophiles (*Alnus*) (Tab. 5.1b).

La position de chaque échantillon sur ces deux axes fournit donc deux indices, le premier témoin d'une pression agricole (valeurs positives de l'axe 1) et le second indicateur d'un environnement pastoral (valeurs positives de l'axe 2). Dans les deux cas, les valeurs négatives retranscrivent un paysage forestier autour de nos structures.

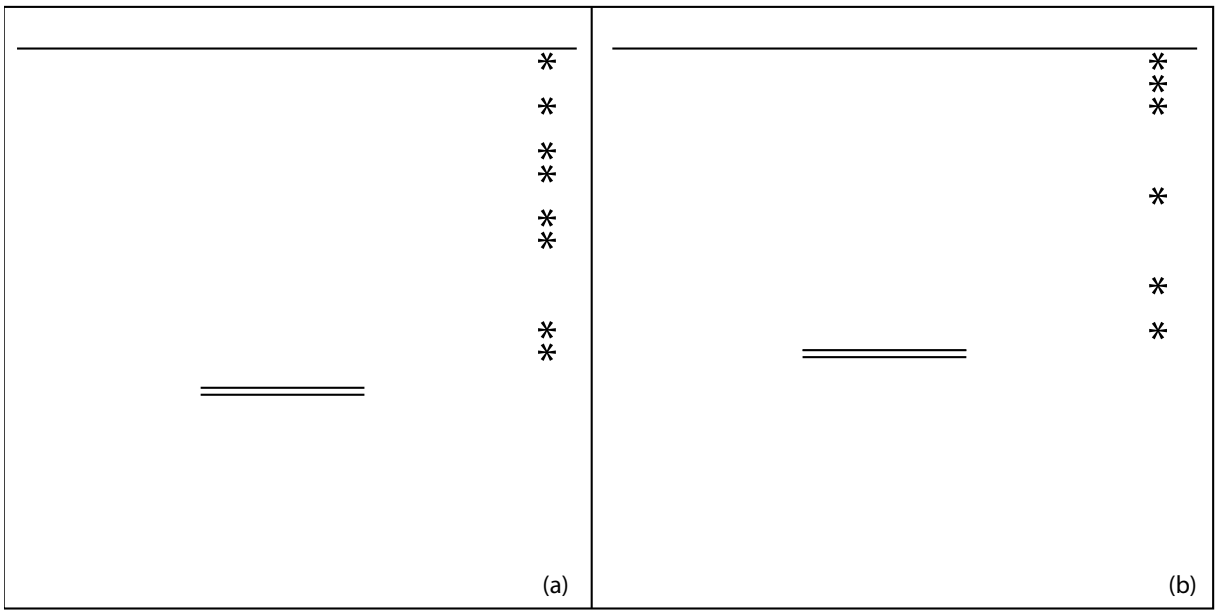


Tableau 5.1 - Liste des taxons polliniques caractéristiques des axes 1 et 2 de l'analyse en composante principale. Seul les taxons de coordonnées inférieures à -0,1 ou supérieures à +0,3 sont indiqués. Les taxons polliniques considérés comme des Indicateurs Polliniques d'Anthropisation (IPA) (Behre, 1986, 1988) sont identifiés par une astérisque (*).

2.2 Pluie pollinique actuelle

L'étude de la pluie pollinique actuelle permet de confronter une image pollinique avec la réalité d'un contexte paysager, d'un type de pratique agro-pastorale (patûre, prairie de fauche, ...) ou d'un peuplement sylvicole.

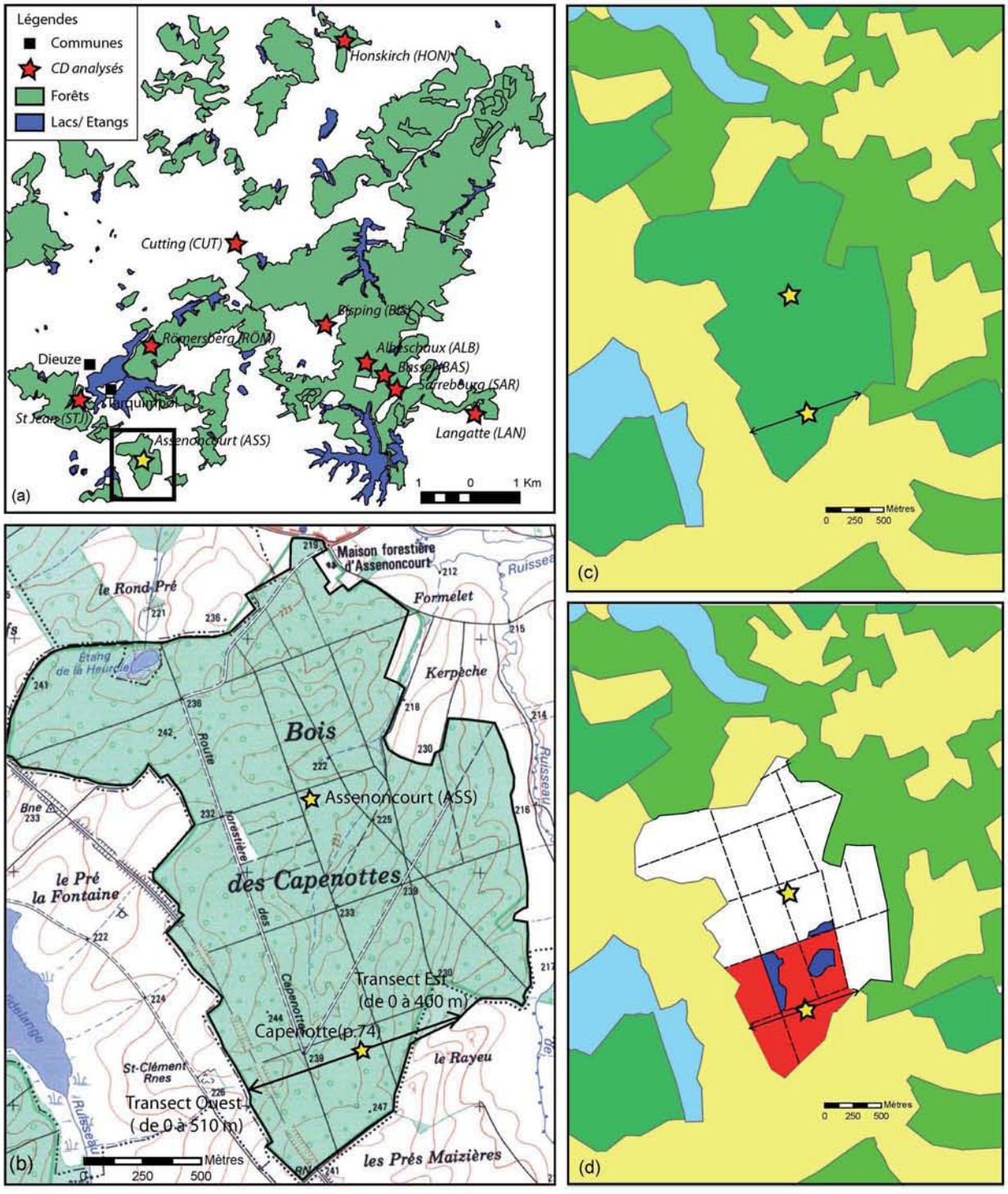
Le but est de comprendre les biais de représentativité pour les différentes taxons étudiés, lors de la représentation des pourcentages polliniques. Ces biais sont liés de façon inhérente aux différences de production pollinique des différentes taxons (PPE - **P**ollen **P**roduction **E**stimates) et à la vitesse de chute des grains de pollen (m/s). Ces deux paramètres ne sont actuellement renseignés que pour quelques taxons polliniques (*Fagus*, *Abies*, ...) (Broström *et al.*, 2008) et font l'objet d'un programme de recherche européen (POLLANDCAL - **POL**len **LAND**scape **CAL**ibration).

Cette pluie pollinique actuelle peut être collectée dans des bryophytes terrestres afin d'être comparés par la suite avec des enregistrements en systèmes tourbeux (Hjelle, 1998). Le nombre d'années de pluie pollinique contenues dans ces mousses est encore aujourd'hui discusté. Certains suggèrent une accumulation de 10 à 20 ans (Heim, 1970), mais des études récentes proposent entre un à deux années de captation de cette pluie pollinique actuelle (Räsänen *et al.*, 2004).

Selon Broström *et al.* (2005), qui se sont intéressés aux paysages du sud de la Suède, la source pollinique pertinente pour les brophytes serait d'environ 400 m. Ce principe de « source pollinique pertinente ou adéquate » (en anglais, RSAP - **R**elevant **S**ource **A**rea of **P**ollen) inventé par Sugita (1994) correspond à une aire « *définie comme la distance pour laquelle l'ajustement de la relation linéaire pollen/végétation est optimale et au delà de laquelle, elle ne peut être améliorée* » (Mazier, 2006). Au delà de cette distance, les grains de pollen constituent l'apport pollinique lointain et leur proportion est constante.

Des simulations et des études empiriques démontrent que des petites dépressions intra-forestières (*forest hollow* et *fen carr*) possédent une RSAP d'un rayon de 50-100 m (diamètre du capteur de 4 m) et de 300-400 m pour des petits lacs (diamètre de 100 m) (Sugita, 1994 ; Calcote, 1995 ; Bunting *et al.*, 2005). Les mardelles du Plateau lorrain possédent généralement des dimensions (10 à 30 m de diamètre). La zone de captation pollinique entre nos mares intra-forestières et les prélèvement de bryophytes se révèlent donc être d'un même ordre de grandeur.

Ainsi, 37 échantillons de bryophytes, principalement *Polytrichum formosum* et *Thuidium tamariscinum*, ont été ramassés en Avril 2005. L'échantillonage a été réalisé le long d'un transect traversant le massif forestier d'Assenoncourt, tous les 30 m et en direction des lisières forestières est et ouest à partir de la mardelle localisée en parcelle 74 (Fig. 5.1). Les préparations chimiques, les identifications et comptages polliniques ainsi que la méthode de représentation graphique des


Légendes
Communes
CD analysés
Forêts
Lacs/ Etangs
Honskirch (HON)
Cutting (CUT)
Bisping (BIS)
Romersberg (ROM)
Dieuze
Albeschaux (ALB)
Basse (BAS)
Sarrebourg (SAR)
St Jean (ST)
Langatte (LAN)
Assenoncourt (ASS)
1 0 1 Km
(a)
Maison forestière d'Assenoncourt
le Rond Pré
Formelet
Kerpèche
Bois
Assenoncourt (ASS)
Route forestière des Capenottes
le Pré la Fontaine
Transect Est (de 0 à 400 m)
Capenotte(p.74)
Transect Ouest (de 0 à 510 m)
St-Clément Rnes
le Rayeu
les Prés Maizières
Mètres
250 500
(b)
Mètres
0 250 500
(c)
Mètres
0 250 500
(d)

résultats (Fig. 5.2) suivent le protocole décrit dans le *Chapitre 2*.
Le de notre étude est d'observer l'évolution du rapport AP/T (Arboreal Pollen/Total Land Pollen) en contexte forestier et suivant la distance à la lisère ainsi que la capacité de propagation des Indices Polliniques d'Anthropisation (IPA) et des céréales (*Cerealia*-type et *Zea*-type) à travers un système forestier. Nous pourrons ainsi confronter la réalité de la composition des peuplements sylvicoles actuels avec les spectres polliniques enregistrés.

2.2.1 Le rapport AP/T

Les pourcentages du rapport AP/T oscillent entre 85% et 90% pour tous les échantillons prélevés dans le massif forestier d'Assenoncourt. Ce pourcentage diminue très progressivement à une distance d'environ 100 m des lisières forestières et atteind alors 75% aux lisières. On observe donc bien une relation entre le contexte paysager (forêt ou lisière) et le pourcentage de pollen arboréen (AP/T). En lisière forestière, le pourcentage de *Corylus* n'augmente pas de façon significative, contrairement à ce que Bégeot (1998) observe dans le Jura.

2.2.2 Indices polliniques d'anthropisation, céréales et ACP

Pour connaitre l'usage agricole actuel des sols autour du massif forestier d'Assenoncourt, nous utilisons la dernière carte d'occupation des sols disponible avant la date de prélèvement des mousses (Corine Land Cover, 2000) (*cf. Fig. 5.1*). Les utilisations des sols en lisière est (pâturages/prairies et quelques champs) et en lisière ouest (champs céréaliers) du massif forestier sont totalement opposées.
A environ 100 m de la lisière est (échantillon E-312), certains taxons polliniques (Anthemideae, Apiaceae, *Artemisia*, Chenopodiaceae, Cichorioideae, *Plantago lanceolata*, *Plantago major/media* et Poaceae) et les scores de l'ACP sur l'axe 2 (« pastoralisme ») augmentent simultanément. Les pourcentages de pollen de plantes cultivées, *Cerealia*-type (E-259) et *Zea*-type (E-360), augmentant également mais plus tardivement.
En lisière ouest, ces taxons polliniques (Anthemideae, Apiaceae, *Artemisia*, Chenopodiaceae, Cichorioideae, *Plantago lanceolata*, *Plantago major/media* et Poaceae) sont enregistrés à des pourcentages très faibles, seul les Urticaceae présentent des pourcentages plus importants. Les pourcentages des plantes cultivées (*Cerealia*-type et *Zea*-type) sont très faibles (< à 5%) malgré la proximité de grandes zones agricoles. Ceci pourrait s'expliquer par la faible productivité et dispersion des pollens de céréales (Heim & Müllenders, 1973 ; Soepboer *et al.*, 2007, 2009).

2.2.3 Image pollinique du peuplement forestier actuel

Le transect pollinique traverse un peuplement forestier très homogène. Au sein de la canopée,

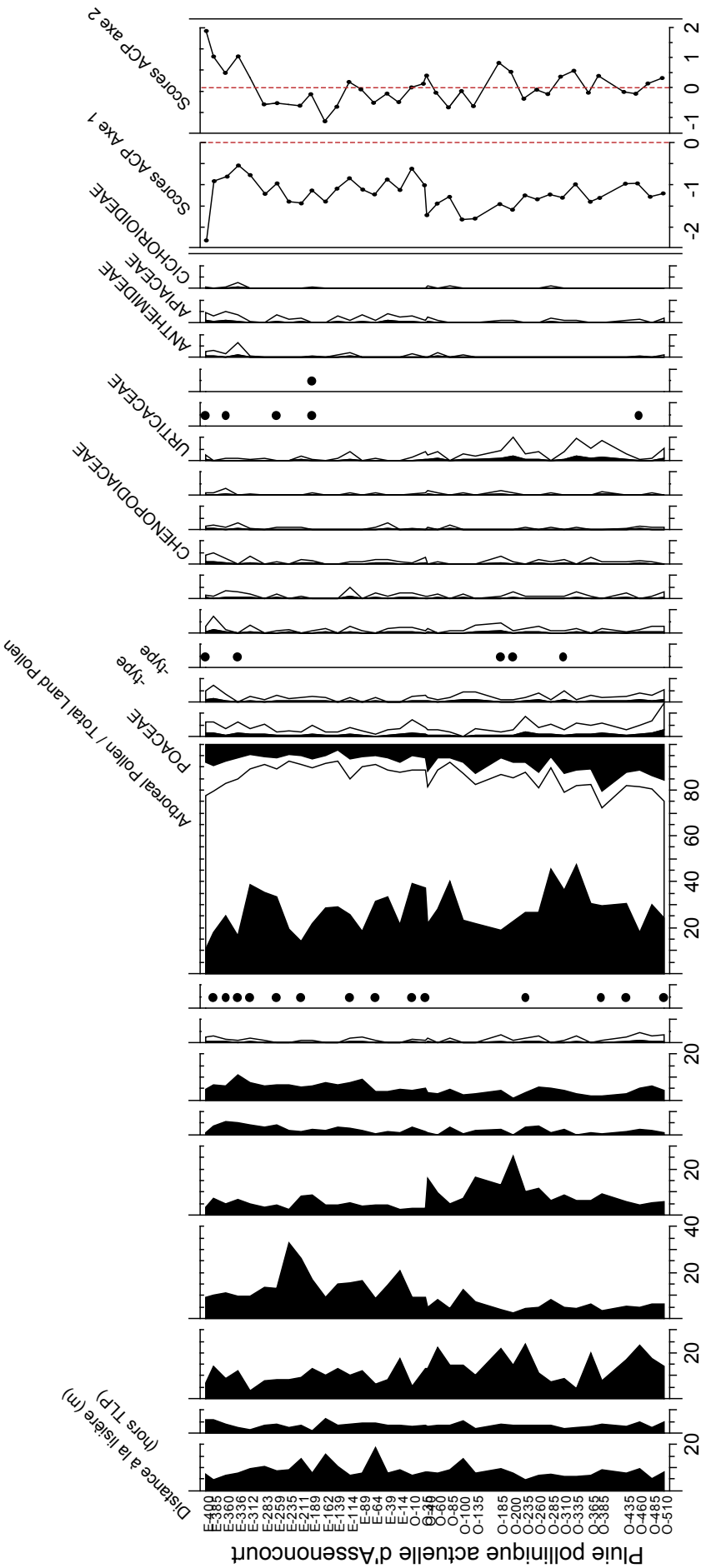


Figure 5.2 - Diagramme pollinique simplifié de la pluie pollinique à Assenoncourt . Les courbes d'exagération correspondent à un facteur multiplicateur de 5. L'abbréviation AP/T correspond à Arboreal Pollen / Total Land Pollen.

l'étage dominant est composé à 80% par *Quercus*, les 20% restants été constitués par *Carpinus*, *Tilia*, *Fraxinus* et *Fagus*. Le sous-étage forestier est exclusivement composé par *Carpinus* (à 70%) et *Tilia* (à 30%). Les pourcentages polliniques de ces essences forestières enregistrés dans les bryophytes présentent une image pollinique en discordance avec la réalité des peuplements actuels.

La principale différence entre pollen/peuplement sylvicole est liée à la représentativité du Chêne (*Quercus robur* et/ou *Quercus petraea*). Dans la séquence de pluie pollinique actuelle, les pourcentages de grains de pollen de *Quercus* oscillent en moyenne à 30%. Ce taxon pollinique est donc sous-représenté par rapport à la réalité du peuplement actuel, 80% dans l'étage dominant. Pourtant, Heim (1970) décrit dans les forêts de basse altitude du Bassin parisien une bonne relation entre spectres polliniques et les relevés de chênaies.

Les poucentages de *Carpinus* dans la pluie pollinique actuelle (10 à 15%) représentent une surreprésentation par rapport à la proportion de charme présent actuellement dans l'étage dominant du peuplement forestier. Une partie de ces pollens pourraient provenir du sous-étage où la proportion de charme est importante (70%). Selon Heim (1970), la présence de *Carpinus* en futaie dans un espace forestier entraînerait une surreprésentation pollinique alors qu'en taillis il serait sous-représenté.

Les autres essences forestières tels que *Fagus* et *Fraxinus* présentent des proportions polliniques en concordance avec les peuplements forestiers actuels. L'augmentation des pollens de *Fagus* à partir des échantillon E-39 à E-235 (*cf. Fig 5.2*), correspond au passage du transect à côté d'un jeune peuplement de hêtre (*cf. Fig. 5.1*). Le pic de *Fraxinus* (25% à l'échantillon O-200) peut être lié à une plus forte représentation, au point de prélévement, de cette essence.

Le long de notre transect, nous n'avons pas identifié de résineux. Les pollens de *Picea* proviennent donc certainement de la forêt voisine du Rénestroff, situé juste au nord du massif d'Assenoncourt, où l'on retrouve des plantations d'épicea (F. Ritz, communication personnelle). *Pinus* étant considéré comme un signal pollinique régional de part sa production pollinique importante et la facilité de dissémination à grande distance de ses pollens (Broström et al., 1998 ; Heim, 1970).

L'étude de cette pluie pollinique actuelle nous suggère plusieurs règles d'interprétation que nous prendrons en compte lors de la description des séquences polliniques fossiles. Nous observons une relation entre implantation en système forestier et pourcentage d'AP/T. Un pourcentage de 80 à 90% suggére donc une localisation dans un système forestier. Ce pourcentage diminue légèrement (AP/T à 75%) en lisière forestière. De plus, les Indices Polliniques d'Anthropisation (IPA) et les céréales (*Cerealia*-type et *Zea*-type) ont une faible pénétration à l'intérieur des massifs forestiers. L'enregistrement sédimentaire d'une mardelle implantée en milieu forestier

ne sera donc pas « pollué » par l'anthropisation autour de ce système forestier.
La relation entre le pourcentage d'un taxon arboréen dans la pluie pollinique fossile et la réalité de sa contribution au peuplement sylvicole diffère selon les essences. Les pourcentages de *Quercus* nous montrerons une sous-représentation par rapport à la réalité du peuplement, à l'opposé de *Carpinus* qui sera plutôt surreprésenté. Certains pollens tels que *Pinus* et *Picea* sont des apports polliniques lointains. Tandis que les pourcentages de *Fagus* et *Fraxinus* présentent de bonnes corrélations avec leur proportions actuelles dans les peuplements sylvicoles.

2.3 Pluie pollinique fossile

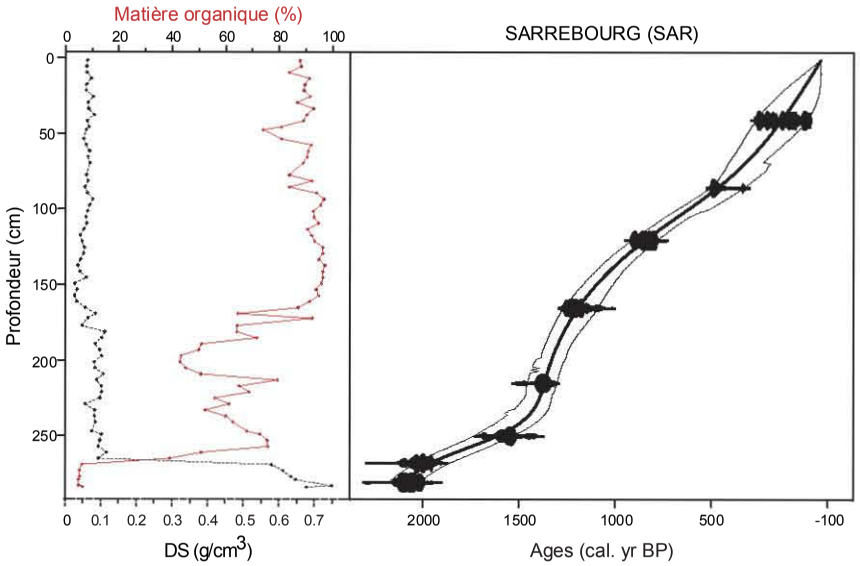
La plupart des études sur l'anthropisation des paysages au cours des temps historiques se sont focalisées sur les écosystèmes montagnards tels que les Pyrénées (Galop, 1998), le Jura (Gauthier, 2004), le Massif Central (Miras, 2004) ou le Morvan (Jouffroy-Bapicot, 2010). Ce fait est lié à la richesse de ces espaces en systèmes sédimentaires naturelles (lacs, tourbières), indispensables à la réalisation d'études paléoenvironnementales.
A basse altitude, ces milieux propices sont rares et la conservation des indicateurs paléobotaniques y est souvent de mauvaise qualité. La plupart des étangs datent de la période médievale et les nombreux assecs ont pu détériorer la stratigraphie des enregistrements et la qualité de conservation des pollens. Paradoxalement, ces régions recélent de nombreuses données archéologiques disponibles grâce aux recherches de l'archéologie préventive (INRAP).
La qualité de conservation du matériel sporo-pollinique dans les mares intra-forestières (Ruffaldi *et al.*, 2007 ; Etienne *et al.*, 2010) en font donc des archives rares des évolutions paysagères et d'anthropisation dans ces régions de basse altitude.

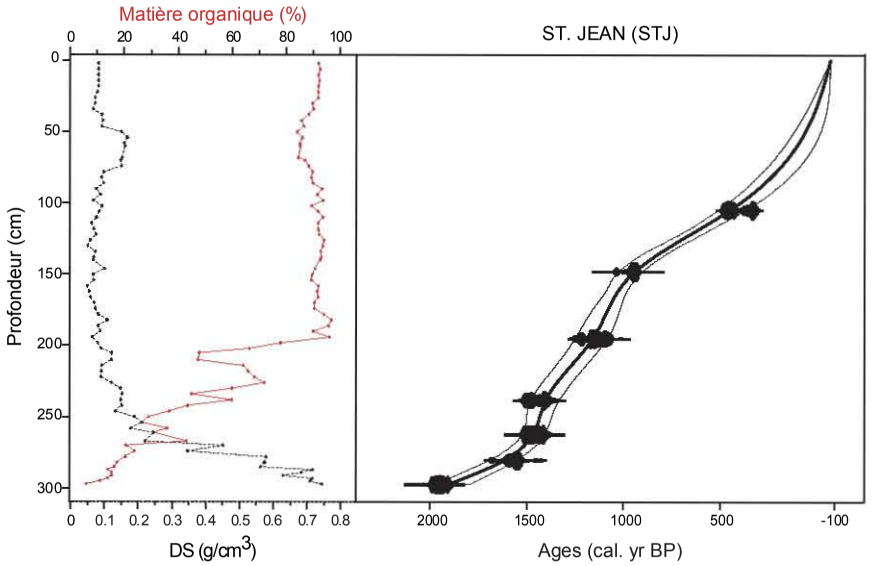
2.3.1 Contrôle chronologique

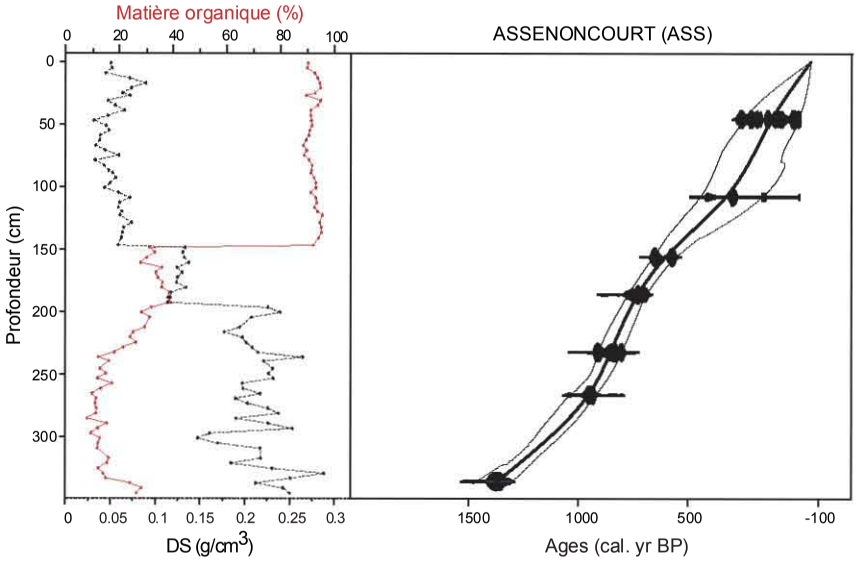
Le contrôle chronologique est assuré par plusieurs datations ^{14}C AMS sur chacune des séquences sédimentaires que ce soit à Assenoncourt (7 datations), au Römersberg (7), à Sarrebourg (8), à Saint Jean (7) et à Bisping (4) (Tab. 5.2). Toutes ces datations radiocarbone ont été réalisées sur des macro-restes terrestres (graines, feuilles ou charbons) préalablement identifiés et triés à la binoculaire (*cf. Chapitre 2*).
Les deux datations radiocarbone (Poz-17959 ; Poz-19286), qui avaient été réalisées préalablement à ce travail de thèse sur des échantillons non triés (*bulk*), n'ont donc pas été conservés. Nous avons également exclu une autre datation radiocarbone (Poz-27481), car les macro-restes (feuilles) envoyés au laboratoire de datation possédait une quantité de carbone (0,3 mg) insuffisante. La datation posséde donc une incertitude trop importante (120 ± 70 BP). Après calibration, on obtient un intervalle de calibration ([284 ; 0] cal. BP) peu pertinant.

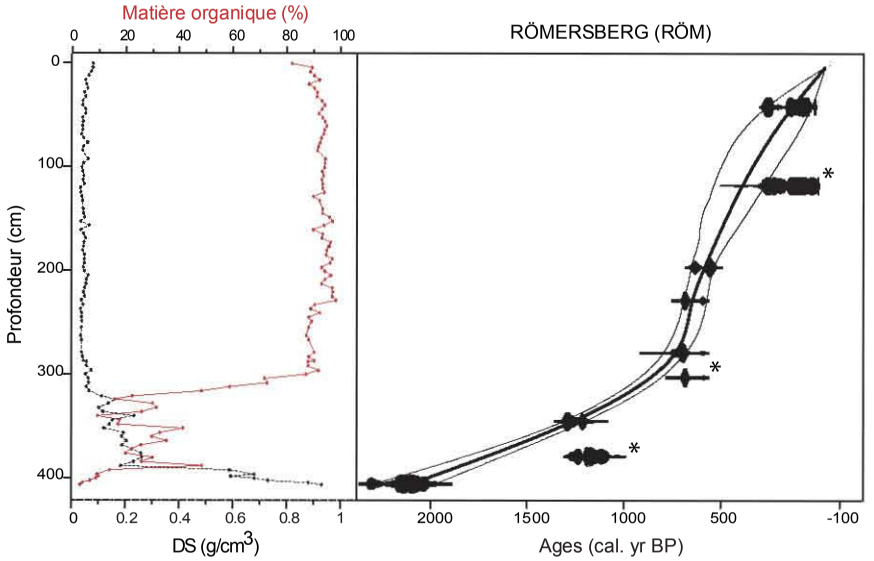
Code Laboratoire	Localisation	Profondeur (cm)	Age radiocarbone (^{14}C en BP)	Age calibré à 2σ (cal. BP)	Age calibré à 2σ (cal. AD)
Poz-12605	Assenoncourt (ASS)	389	1490 ± 30BP	[1306;1482]	[468;644]
Poz-19138	Assenoncourt (ASS)	320	1035 ± 30BP	[914;1051]	[899;1036]
Poz-12604	Assenoncourt (ASS)	286	955 ± 30BP	[795;927]	[1023;1155]
Poz-19137	Assenoncourt (ASS)	240	825 ± 30BP	[686;786]	[1164;1264]
Poz-12603	Assenoncourt (ASS)	210	660 ± 30BP	[558;672]	[1278;1392]
Poz-18026	Assenoncourt (ASS)	122	260 ± 30BP	[0;431]	[1519;1951]
Poz-19136	Assenoncourt (ASS)	60	140 ± 30BP	[0;281]	[1669;1953]
Poz-33736	Römersberg (RÖM)	450	2120 ± 50BP	[2306;1951]	[-357;-2]
Poz-17959	**Römersberg (RÖM)**	**424**	**1225 ± 30BP**	**[1065;1260]**	**[690;885]**
Poz-37837	Römersberg (RÖM)	390	1310 ± 30BP	[1179;1293]	[657;771]
Poz-19286	**Römersberg (RÖM)**	**390**	**1140 ± 30BP**	**[968;1168]**	**[782;982]**
Poz-27483	Römersberg (RÖM)	343	725 ± 30BP	[572;723]	[1227;1378]
Poz-27482	Römersberg (RÖM)	282	740 ± 40BP	[569;735]	[1215;1381]
Poz-19285	Römersberg (RÖM)	232	700 ± 30BP	[564;688]	[1262;1386]
Poz-23354	Römersberg (RÖM)	200	540 ± 35BP	[511;638]	[1312;1439]
Poz-27481	**Römersberg (RÖM)**	**144**	**120 ± 70BP**	**[0;284]**	**[1666;1954]**
Poz-23361	Römersberg (RÖM)	38	95 ± 30BP	[0;267]	[1683;1954]
Poz-23355	Sarrebourg (SAR)	281	2095 ± 30BP	[1994;2144]	[-195;-45]
Poz-23363	Sarrebourg (SAR)	268	2050 ± 30BP	[1931;2114]	[-165;19]
Poz-31541	Sarrebourg (SAR)	250	1655 ± 35BP	[1418;1691]	[259;532]
Poz-27480	Sarrebourg (SAR)	215	1500 ± 30BP	[1312;1508]	[442;638]
Poz-27479	Sarrebourg (SAR)	165	1255 ± 30BP	[1085;1277]	[673;865]
Poz-27478	Sarrebourg (SAR)	120	935 ± 25BP	[792;920]	[1030;1158]
Poz-27477	Sarrebourg (SAR)	85	410 ± 25BP	[334;514]	[1436;1616]
Poz-31544	Sarrebourg (SAR)	40	135 ± 30BP	[0;279]	[1671;1953]
Poz-33738	St Jean (STJ)	297	1995 ± 30BP	[1878;2000]	[-51;72]
Poz-17964	St Jean (STJ)	280	1660 ± 30BP	[1422;1691]	[259;528]
Poz-19135	St Jean (STJ)	262	1565 ± 30BP	[1390;1527]	[423;560]
Poz-19284	St Jean (STJ)	238	1545 ± 30BP	[1369;1522]	[428;581]
Poz-27454	St Jean (STJ)	195	1220 ± 30BP	[1063;1258]	[692;887]
Poz-23359	St Jean (STJ)	148	1050 ± 30BP	[924;1052]	[898;1026]
Poz-27453	St Jean (STJ)	105	370 ± 30BP	[317;503]	[1447;1633]
Poz-31506	Bisping (BIS)	350	1810 ± 30BP	[1626;1820]	[130;324]
Poz-33735	Bisping (BIS)	334	1595 ± 30BP	[1409;1542]	[408;541]
Poz-33729	Bisping (BIS)	298	1510 ± 30BP	[1315;1516]	[434;635]
Poz-33740	Bisping (BIS)	270	820 ± 35BP	[679;789]	[1161;1271]

Tableau 5.2 - Datations radiocarbone AMS des séquences d'Assenoncourt (ASS), de Bisping (BIS), du Römersberg (RÖM), de Sarrebourg (SAR) et de Saint Jean (STJ), calibrées à l'aide de l'IntCal09 du logiciel Calib 6.0.1 (Reimer *et al.*, 2009). Les datations radiocarbone en gras sont celle n'ayant pas été conservées dans la construction des modèles age-profondeur de la séquence sédimentaire du Römersberg (RÖM).


Matière organique (%)
SARREBOURG (SAR)
Profondeur (cm)
DS (g/cm3)
Ages (cal. yr BP)


Matière organique (%)
ST. JEAN (STJ)
Profondeur (cm)
DS (g/cm3)
Ages (cal. yr BP)


Matière organique (%)
ASSENONCOURT (ASS)
Profondeur (cm)
DS (g/cm3)
Ages (cal. yr BP)


Matière organique (%)
RÖMERSBERG (RÖM)
Profondeur (cm)
DS (g/cm3)
Ages (cal. yr BP)

Les modèles âge-profondeur sont construits à partir des datations AMS et suivant un lissage (*smooth*) de type *spline* grâce au logiciel Clam (Blaauw, 2010) (*cf. Chapitre 2*). Le but de la construction de ces modèles âge-profondeur (Fig. 5.3 et Fig. 5.4) est de fournir un âge probable des profondeurs non datées, par extrapolation des taux de sédimentation. Ceci permet alors la représentation des données polliniques et les résultats des analyses d'ACP selon l'âge du sédiment et non plus sa profondeur.

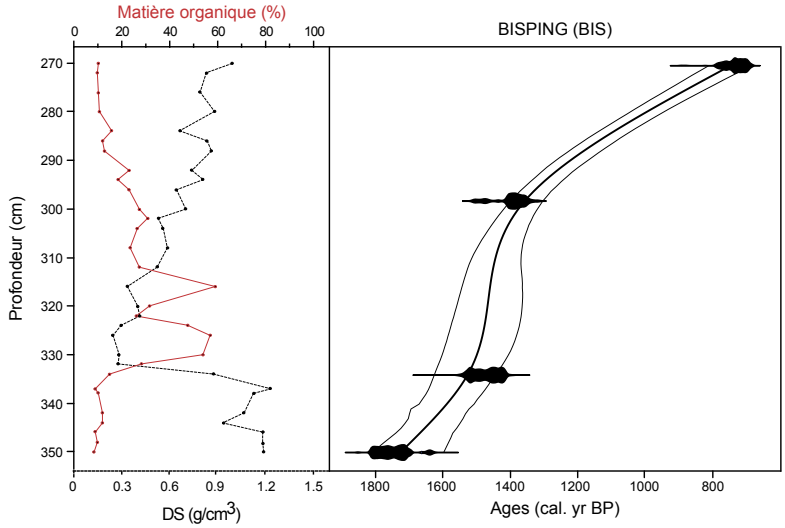


Figure 5.4 - Densité sèche (DS), Matière Organique (MO) et Modèles âge-profondeur de la séquence de Bisping (BIS) construit grâce au logiciel Clam (Blaauw, 2010).

2.3.2 Description de l'anthropisation depuis 2000 ans grâce aux mardelles

Les diagrammes polliniques des séquences d'Assenoncourt, de Bisping, du Römerbserg, de Sarrebourg et de St. Jean sont présentés de la Figure 5.5 à la Figure 5.9. Les scores sur l'axe 1 et l'axe 2 de l'Analyse en Composante Principale (ACP) pour ces cinq séquences sont présentés en Figure 5.10.

2.3.2.1 Second Age du Fer (La Tène): *2150/2000 cal. BP*

Les analyses polliniques et les scores d'ACP décrivent un paysage ouvert et majoritairement composé de pâtures et de quelques champs. Les forêts sont distantes de nos structures ou seuls quelques arbres (*Quercus*) isolés subsistent. Les scores d'ACP sur l'axe 1 et les faibles proportions de pollen de céréales (*Cerealia*-type < 2%) décrivent une faible culture céréalière à cette période.

D'un point de vue archéologique, cette période correspond à la période d'activité du site du "Briquetage de la Seille" (Olivier & Kovacik, 2006) (cf. *Chapitre 1*). Ce site n'est situé qu'à une dizaine de kilomètre de la ville de Dieuze, et donc de nos sites d'étude d'Assenoncourt, Römersberg et St. Jean.

2.3.2.2 Période Romaine : *2000/1500 cal. BP*

Les inventaires d'établissements ruraux réalisés sur un territoire entre la vallée du Nied et de la Seille par J.-D. Laffite (2004) retranscrivent, sur le Plateau lorrain, une densité impressionnante de ces établissements (de 1,33 à 0,75 par km²). Ils sont complétés par de grandes villas telles que celle de Saint-Ulrich (Lutz, 1971, 1972) et la villa de Bassing (J.-D. Laffite, communication personnelle). Cette densité est assez proche d'autres estimations proposées pour la Gaule Belgique (Ferdière, 1988).

Nos résultats décrivent une certaine stabilité de l'anthropisation entre la période gauloise et la conquête romaine. Durant le Haut Empire, les paysages sont toujours très majoritairement composés de pâturages. La pression anthropique est toujours très forte et correspond certainement au développement, après la conquête romaine, de la ville de *Decemp Pagi* (Tarquimpol) (cf. *Chapitre 1*).

Au cours de l'Antiquité tardive (~250 cal. BP), le rapport AP/T, les indices d'anthropisation et les scores de l'axe 2 diminuent progressivement alors que les taxons d'arbres héliophiles (*Corylus*) et pionniers (*Betula*) augmentent. Cette dynamique traduit une reprise forestière des champs et des pâtures abandonnés. Cette période correspond à la destruction partielle de la ville de Tarquimpol (Henning *et al.*, 2010). Les habitants de la ville romaine de Tarquimpol, qui été auparavant ouverte sur la capagne environnate, érigent alors de puissantes fortifications derrière lesquelles une population restreinte se retranche (*cf. Chapitre 2*).

2.3.2.3 Haut Moyen Age (Mérovingien/Carolingien) : *1500/1050 cal. BP*

L'histoire locale est beaucoup plus lacunaire mais une implantation continue à Tarquimpol est confirmée par la découverte de tombes Mérovingiennes sous l'église actuelle (Halsall, 1995). Le paysage très ouvert et principalement composé de pâtures au cours de l'Age du fer et de la période Romaine, disparaît à cette période. L'impact anthropique diffère alors entre nos structures.

La zone de Saint Jean (STJ), très proche de la ville antique de Tarquimpol et située le long de l'ancienne voie romaine, fut la première ré-ouverte après une courte reprise forestière. Au paysage antique, très pastoral, se substitue un paysage plus hétéroclite avec des cultures céréalières (blé, chanvre), des arbres fruitiers (noyer et châtaignier) ainsi que des pâtures. *Les structures qui sont aujourd'hui plus distantes des lisières (Assenconcourt, Römersberg) enregistrent une pression anthropique plus faible.*

Les structures d'Assenoncourt et de St Jean sont utilisées en tant que fosse de rouissage durant le 5ème siècle ap. J.C (1350-1400 cal. BP). Cette pratique, dans le cas de la mardelle d'Assenoncourt, confirme que cette espace forestier n'était pas laissé à l'écart de toute pression anthropique. La pratique du rouissage est documentée dans d'autres mardelles en Lorraine (Blouet and Klag,

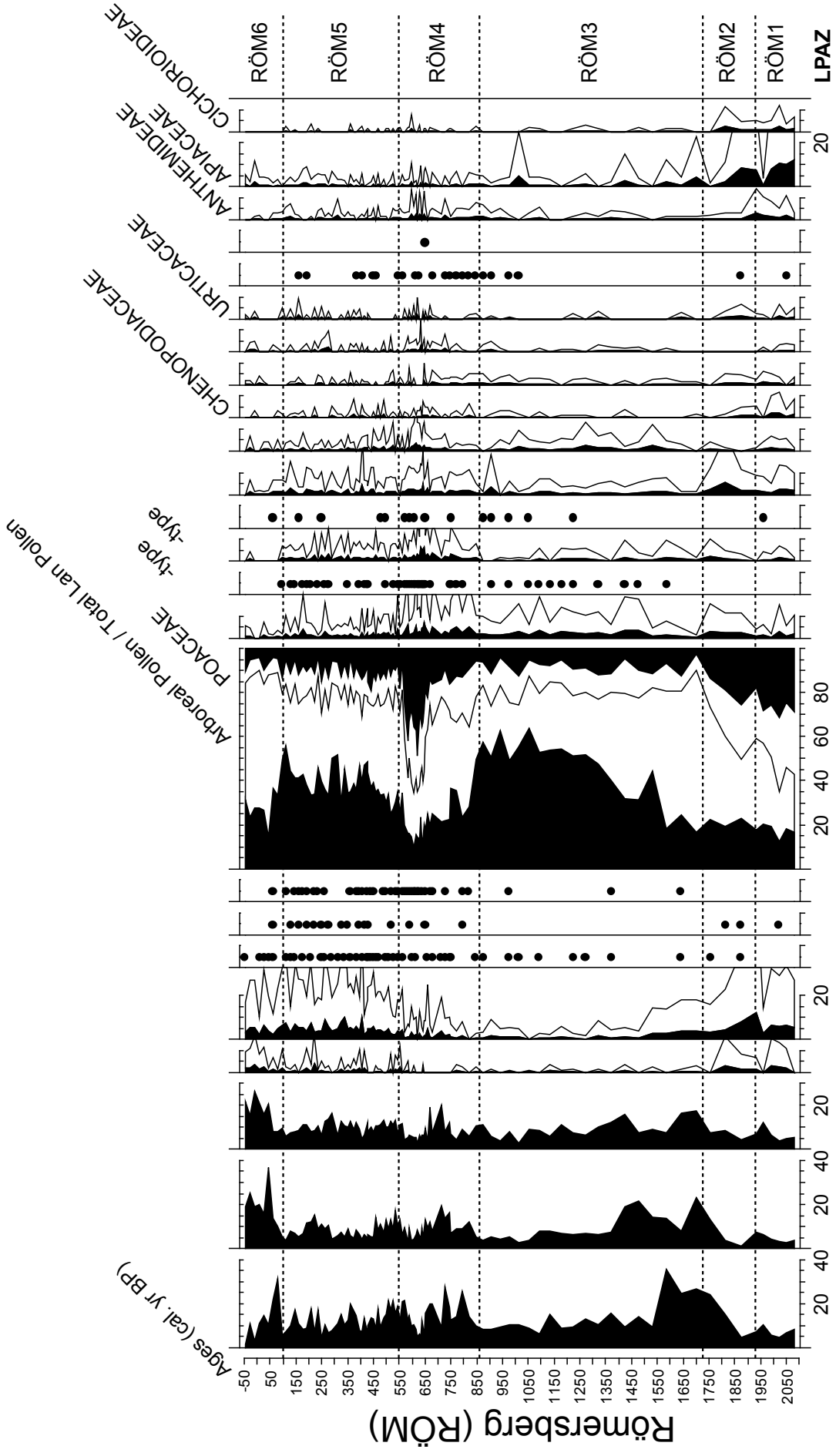


Figure 5.5 - Diagramme pollinique simplifié de la séquence du Römersberg (RÖM) exprimé en âge (cal. yr BP). Les courbes d'exagération (en clair) correspondent à un facteur multiplicateur de 5. Les abbréviations AP/T correspond à Arboreal Pollen / Total Land Pollen et LPAZ à Local Pollen Assemblage Zone.

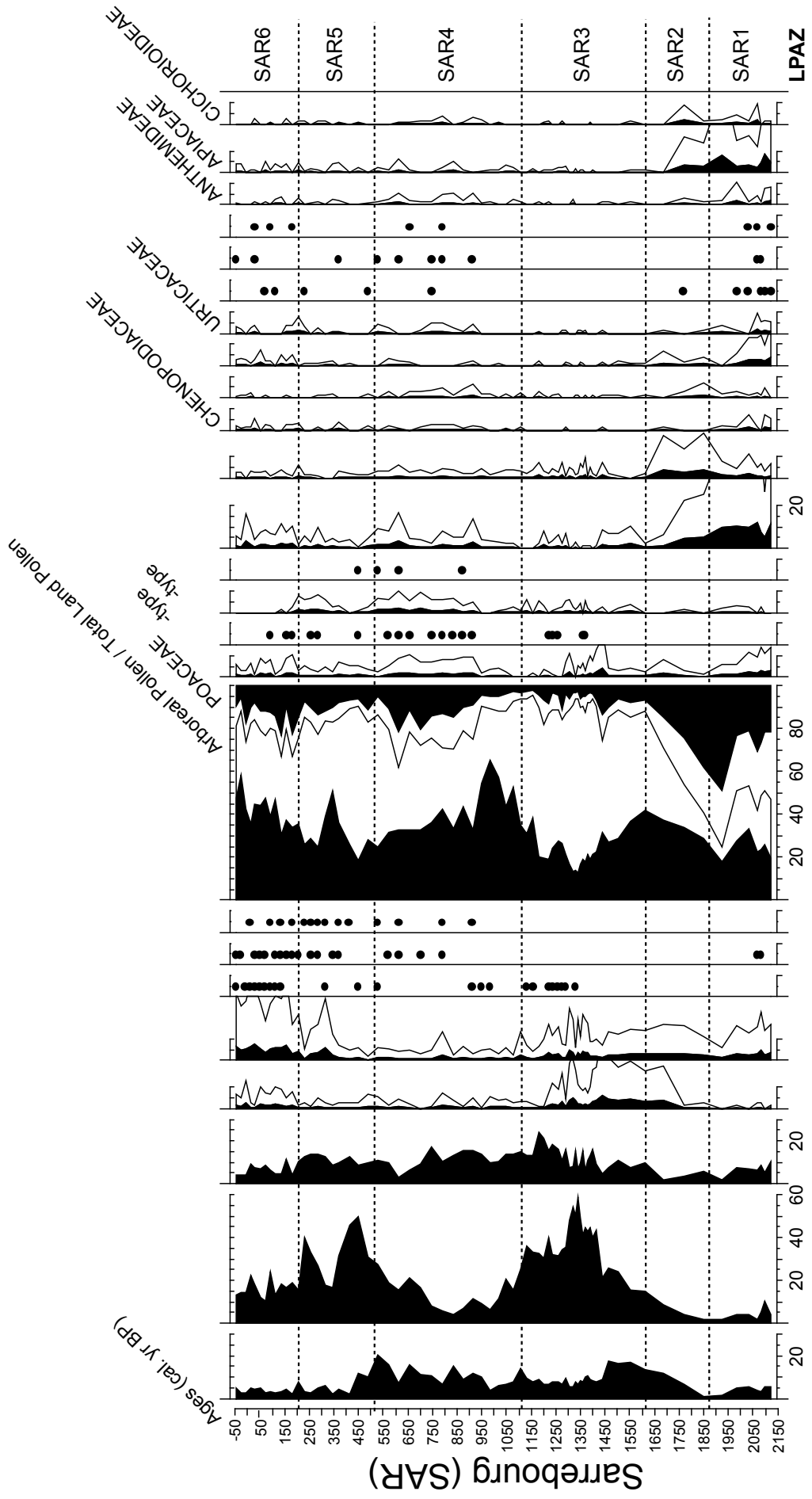


Figure 5.6 - Diagramme pollinique simplifié de la séquence de Sarrebourg (SAR) exprimé en âge (cal. yr BP). Les courbes d'exagération (en clair) correspondent à un facteur multiplicateur de 5. Les abbréviations AP/T correspond à Arboreal Pollen / Total Land Pollen et LPAZ à Local Pollen Assemblage Zone.

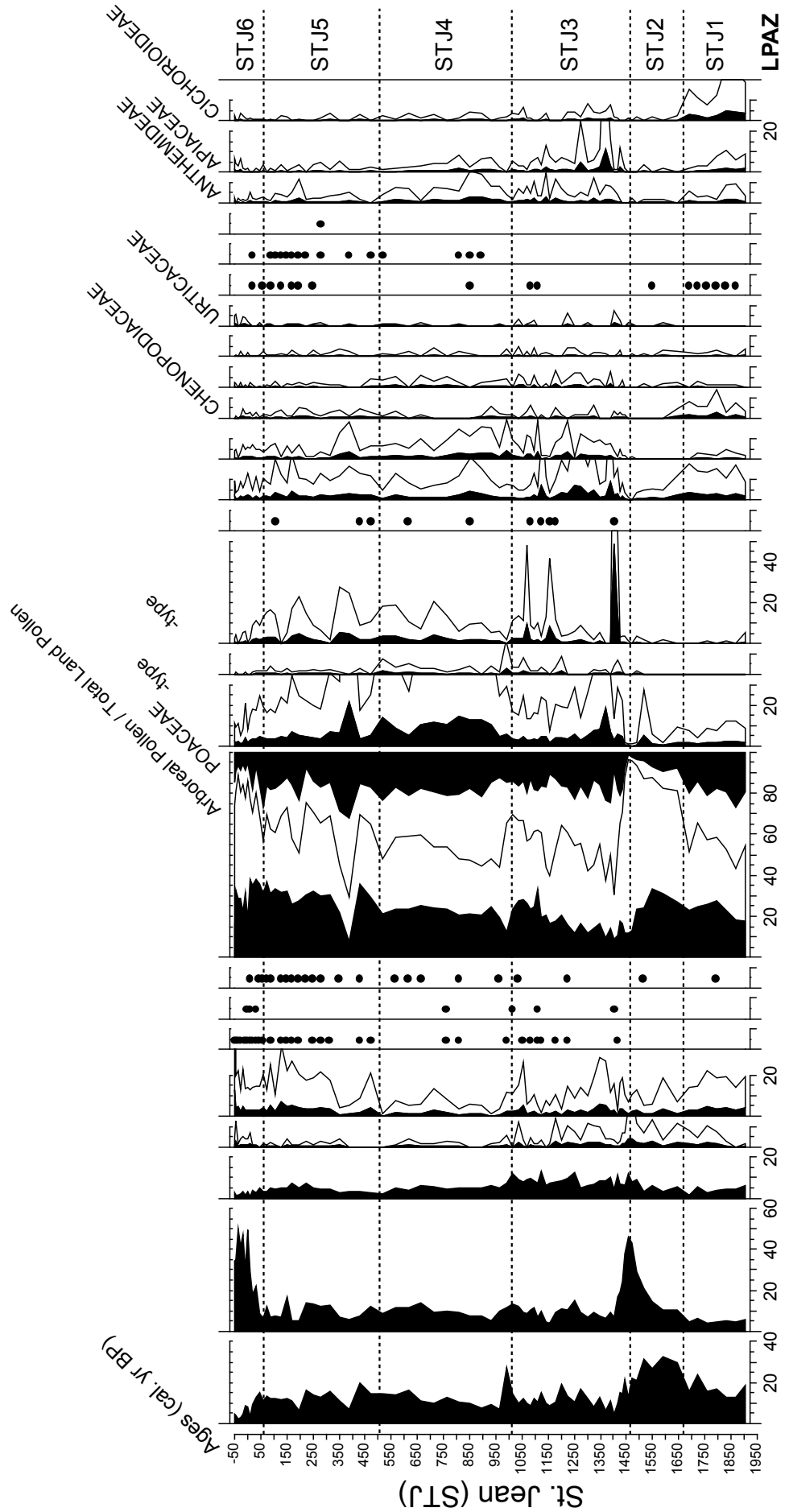


Fig.ure 5.7 - Diagramme pollinique simplifié de la séquence de Saint Jean (STJ) exprimé en âge (cal. yr BP). Les courbes d'exagération (en clair) correspondent à un facteur multiplicateur de 5. Les abbréviations AP/T correspond à Arboreal Pollen / Total Land Pollen et LPAZ à Local Pollen Assemblage Zone.

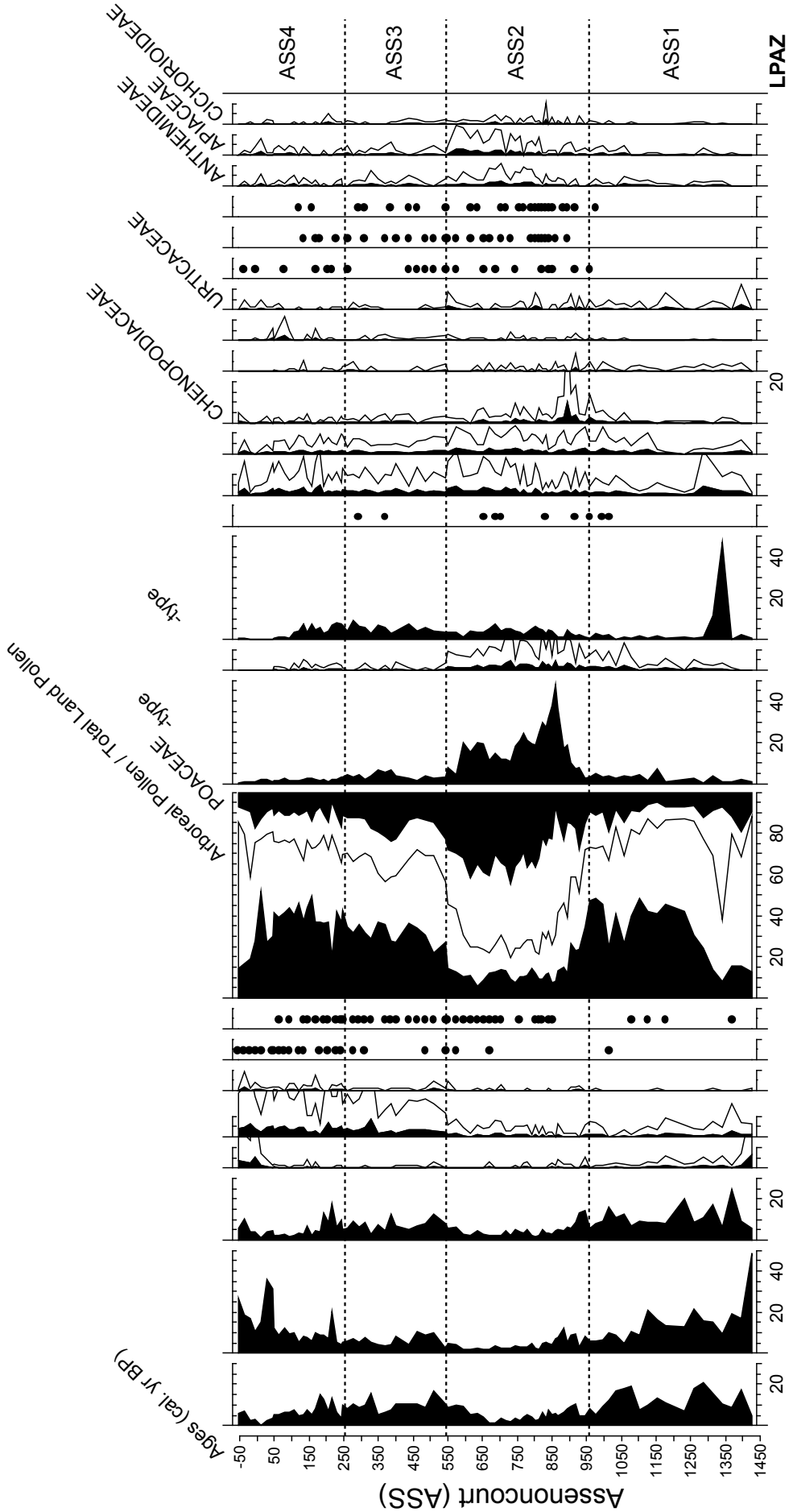


Fig.ure 5.8 - Diagramme pollinique simplifié de la séquence d'Assenoncourt (ASS) exprimé en âge (cal. yr BP). Les courbes d'exagération (en clair) correspondent à un facteur multiplicateur de 5. Les abbréviations AP/T correspond à Arboreal Pollen / Total Land Pollen et LPAZ à Local Pollen Assemblage Zone.

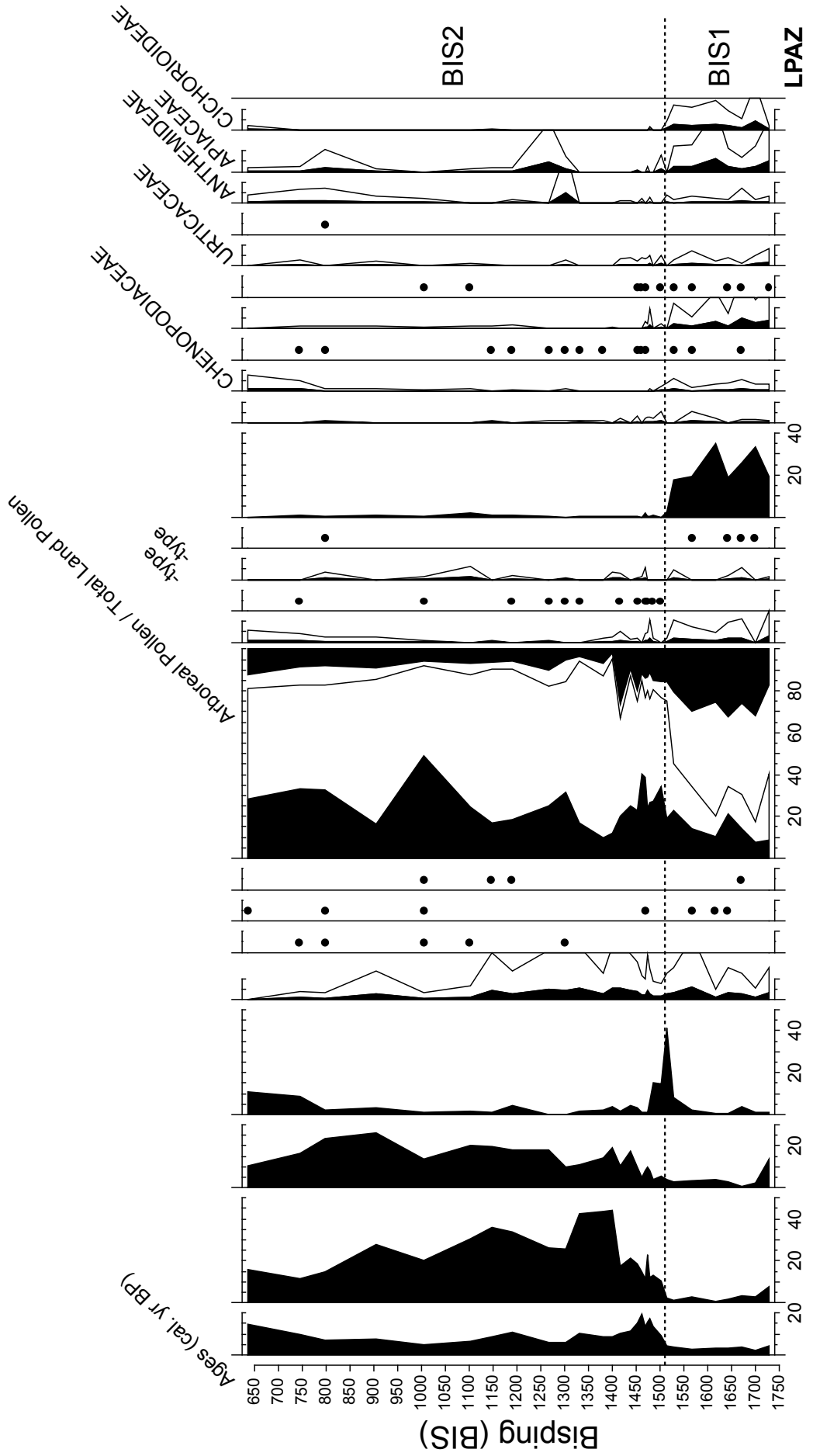


Figure 5.9 - Diagramme pollinique simplifié de la séquence de Bisping (BIS) exprimé en âge (cal. yr BP). Les courbes d'exagération (en clair) correspondent à un facteur multiplicateur de 5. Les abbréviations AP/T correspond à Arboreal Pollen / Total Land Pollen et LPAZ à Local Pollen Assemblage Zone.

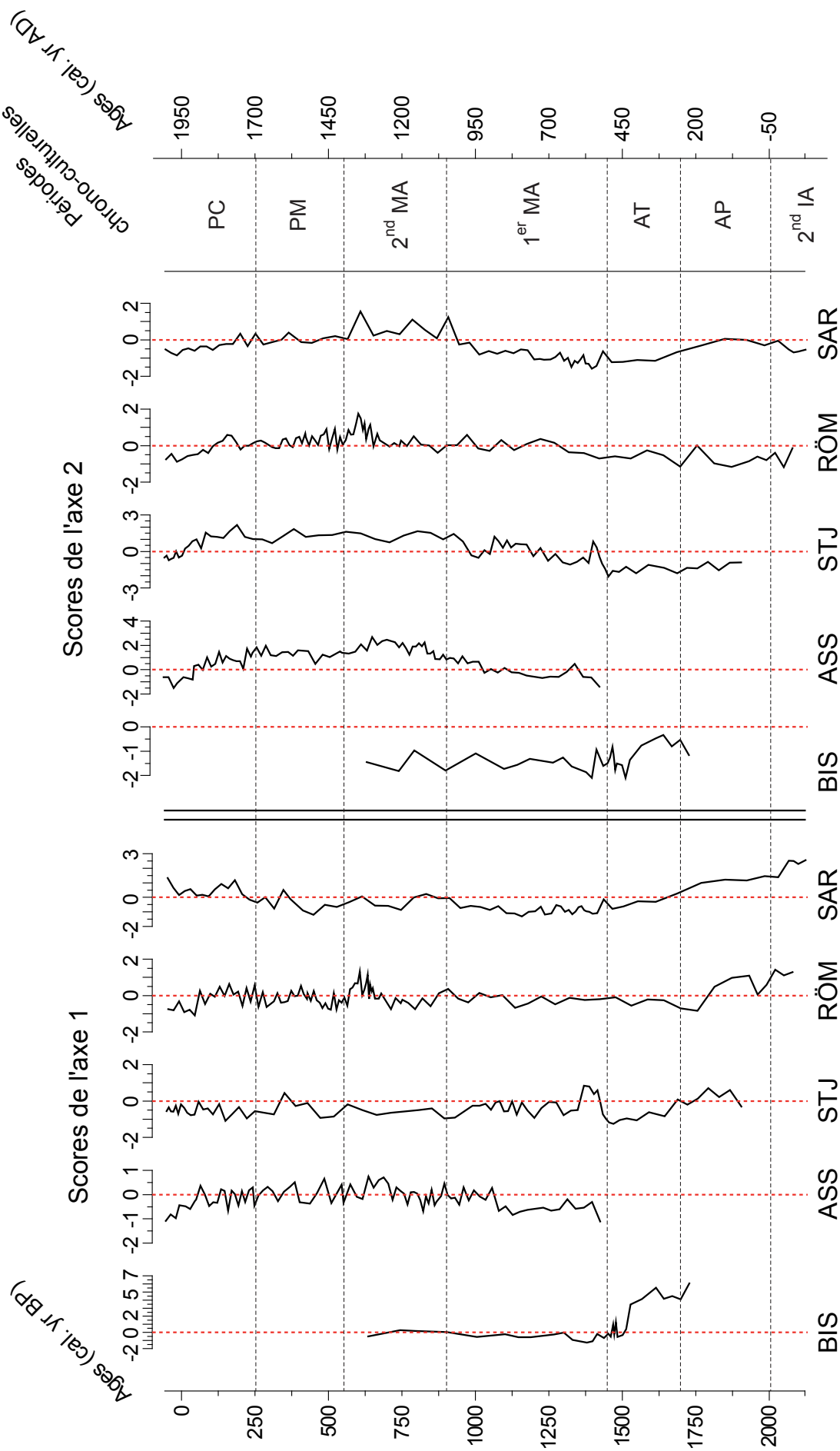


Figure 5.10 - Synthèse des scores d'ACP sur les axes 1 et 2 pour les séquences du Römersberg (RÖM), de Sarrebourg (SAR), Saint Jean (STJ), d'Assenoncourt (ASS) et de Bisping (BIS). PC : Période Contemporaine ; PM : Période Moderne ; 2nd MA : Moyen Age classique ; 1er MA : Haut Moyen Age ; AT : Antiquité tardive ; AP : le Haut-Empire et 2nd IA : le second Age du fer (La Tène) .

1987) mais également dans des lacs en France (E. Doyen, communication personnelle) et en Europe (Grönlund *et al.*, 1986 ; Lotter, 1999 ; Schofield & Waller, 2005 ; Riera *et al.*, 2006).
La mardelle de Sarrebourg (SAR), localisée à distance des centres urbains de Sarrebourg et Dieuze, enregistre une anthropisation très faible et le développement d'un important couvert forestier caractérisé par des pourcentages élevés de charme (*Carpinus*) jusqu'au Moyen Age classique.
Généralement en France, les premières occurrences de *Carpinus* datent environ de 2800 cal. BP mais sa réelle expansion est concomitante dans toutes nos séquences (BIS2, STJ1, ROM2, SAR2 et début d'ASS1) et correspond à la fin de la période Gallo-romaine. La reconquête des espaces pastoraux et agraires est alors dominée par le noisetier (*Corylus*) avant l'expansion des pourcentages de bouleau (*Betula*), du frêne (*Fraxinus*) et du charme (*Carpinus*) dont les pourcentages atteignent de 20% à 40%. A Sarrebourg, cette phase de domination du charme couvre une période de 350 ans (1450 à 1100 cal. BP) avec une anthropisation très faible voire nulle. Alors qu'à Saint-Jean, cette dynamique ne couvre qu'à peine 100 ans (autour de 1450 cal. BP) et est interrompue par une reprise rapide et intense de l'anthropisation. Mis à part à Saint Jean, ce développement du charme est suivi d'une expansion du chêne atteignant 40%. Ces pourcentages successivement élevés de *Carpinus* et *Quercus* sont difficiles à retranscrire en composition des massifs forestiers.
De telles proportions de pollen de *Quercus* sont enregistrées dans la pluie pollinique locale (*cf. Fig. 5.1*) dans le massif forestier d'Assenoncourt. Ces pourcentages correspondent à la présence en futaie d'une couverture de chêne quasiment mono-spécifique (80% dans l'étage dominant). Sur nos séquences, de telles proportions de *Quercus* pourraient donc correspondre à une sélection anthropique de cette essence par exemple pour la glandée et une utilisation potentielle de ces forêts en tant que vaîne pâture (Heitz-Weniger, 1977).
A l'opposé, des pourcentages identiques de charmes (40%) ne correspondent certainement pas à un peuplement forestier monospécifique ou dominé par cette essence. D'un point de vue pollinique, le charme n'est pas un taxon sous-représenté en comparaison avec la réalité des peuplements actuels. Ainsi des proportions élevées de Carpinus (40%), taxon pollinique surreprésenté, et plus faible de Quercus (20%), taxon pollinique sous-représenté, peuvent correspond en réalité à des peuplements forestiers dont l'étage dominant est partagé entre ces deux essences. Il pourrait s'agir également de taillis sous futaie plus ou moins appauvris en chêne par rapport au charme, situation classique en cas de surexploitation de la forêt pour bois de chauffage.

2.3.2.4 Moyen Age classique : *1050/550 cal. BP*

Localement, l'industrie du sel se développe avec l'installation d'une saline Royale à Dieuze et

la création des étangs par endiguement des vallées (Stock, Lindre et Mittersheim) en tant que réserves de pêche et de gibier d'eau pour les jours maigres (Degron, 1995).
Dès lors, l'augmentation de la pression anthropique est enregistrée dans toutes nos séquences. Les cultures du seigle (*Secale*-type) et du chanvre (*Cannabis/Humulus*) se développent alors que la pratique pastorale reste présente. Les faibles proportions de pollens arboréens (STJ, ASS, RÖM) sont dominées par le chêne (*Quercus*).

Broström *et al.* (2004) démontrent que plusieurs taxons arboréens, dont le chêne, présente une production pollinique qui est 6 à 8 fois supérieure à celle des Poaceae. Ce paramètre souligne la sous-estimation de l'ouverture des paysages anciens à partir des données fossiles si l'on ne considère que cette proportion de NAP (Non Arboreal Pollen) (Sugita *et al.*, 1999). Nos deux grandes phases d'ouvertures du milieu sont caractérisées à chaque fois par un faible taux de pollen arboréens (AP/T de 40%, donc NAP de 60%). Parmis ce pourcentage de pollens arboréens, on observe une proportion toujours proche de 20% de pollens de chêne. Cette image pollinique suggère une localisation de la mardelle dans un milieu ouvert (prairie ou champs) et un apport pollinique lointain de *Quercus* lié à l'ouverture du milieu (Sugita, 1994).

2.3.2.5 Moyen Age classique / Période Moderne : *550/150 cal. BP*

Le développement industriel des salines entraîne des problèmes d'approvisionnement en matière première. Certaines zones sont alors allouées à la saline Royale de Dieuze en tant que réserve de bois (Degron, 1995). Les recherches dans les archives locales par Catherine Zeller (2011) mettent au jour des documents prouvant l'allocation des massifs forestiers du Römersberg, d'Assenoncourt et de St. Jean aux salines de Dieuze (Annexe 15).
Les indices d'anthropisation diminuent rapidement mais ne disparaissent pas totalement ceci pouvant traduire la continuité des pratiques agricoles et pastorales à la lisière forestière. La dynamique de colonisation forestière, par *Corylu*s avant le développement de *Carpinus* et *Fagus* puis la domination finale de *Quercus*, est très rapide. Les pourcentages et la composition en taxon arboréen sont constantes durant toute cette période. Cette image pollinique correspond selon les textes historiques à une pratique sylvicole d'exploitation en taillis et à courte rotation, approximativement tous les 35 ans, des massifs forestiers à partir au moins du 15ème siècle après J.-C. jusqu'à l'avènement de la révolution industrielle (Badré, 1992 ; Degron, 1995) (Annexe 16).
En parallèle, l'augmentation des pourcentages de *Pinus* et *Picea* à cette période correspond certainement à une implantation de ces deux essences au sein du Plateau lorrain.
Les sols environnants la mardelle de Sarrebourg sont couverts de forêts depuis la fin de la période

Romaine, même si apparemment la lisière forestière a fluctué durant le Moyen Age classique. Une diminution progressive du rapport AP/T et l'augmentation des scores du facteur 2 retranscrit la création d'ouvertures dans le couvert forestier pour l'installation de pâtures. Ceci correspond à la création de la ferme d'*Alzing* au cours du 16ème siècle et de l'ouverture de la *Ferme des friches* au milieu du 18ème siècle. La *Ferme des friches* crée entre 211 cal. BP et 194 cal. BP, entre la carte des Naudins (1728-173) et la carte de Cassini (1756-1789), correspond a une ouverture à seulement une centaine de mètres de notre capteur.

2.3.2.6 Période Moderne à Aujourd'hui: *150/-50 cal. BP*

A partir de 1850, la révolution industrielle modifie les besoins en bois des industries salines. L'utilisation du bois en tant que combustible est abandonnée et remplacée par le charbon. Ainsi les forêts jusqu'alors allouée aux salines de Dieuze (Römersberg, Assenoncourt, St. Jean) passent sous l'autorité de l'Office des Eaux et Forêts. De façon concordante, les pourcentages de *Carpinus* et *Fraxinus* augmentent alors sur ces trois séquences (pas à Sarrebourg) et le pourcentage de *Quercus* diminue. Cette image pollinique se poursuit jusqu'à aujourd'hui où nous pouvons alors noter une importante disjonction entre l'image pollinique et la réalité des peuplements observés ; 70% de chêne (*Quercus*) [30% en pollens], 10% de charmes (*Carpinus*) [20 à 25% en pollens], 10% de hêtre (*Fagus*) [5 à 20% en pollens] et 10% d'autres taxons arboréens tel que le frêne (*Fraxinus*) [5% en pollens].

Toutefois les scores sur les deux axes de l'ACP sont parfaitement corrélés avec la réalité paysagère environnante. Les valeurs sur l'axe 2 sont toutes négatives avec des valeurs d'environ -1 pour les deux mardelles les plus éloignées de la lisière (Assenoncourt et Römersberg), moins négatives (-0,5) pour la mardelle de St. Jean plus proche de la lisière et des valeurs positives (+1,5) pour la mardelle de Sarrebourg localisée à seulement 300 mètres de pâtures actuelles. En comparaison les scores d'ACP pour l'axe 1 sont également toutes négatives (en moyenne de -0,5) malgré la présence de très nombreux champs cultivés (maïs, blé, orge) entourant les massifs d'Assenoncourt et de Saint Jean.

2.3.3 Analyse de la séquence du bas-marais de Francaltroff (FRA)

Le bas-marais de Francaltroff est localisé au nord de notre zone d'étude à quelques kilomètres de la mardelle de Honskirch (HON) (*cf. Fig 5.1a ; Chapitre 1*). Il s'agit de la seule séquence sédimentaire du Plateau lorrain recouvrant l'ensemble de l'Holocène. Elle permet de replacer nos résultats obtenus grâce à l'étude des remplissages sédimentaires des mardelles, dans une vision plus régionale et grâce à un capteur sédimentaire de grande dimension, et de leur donner une perspective historique plus comparable au lacs et tourbières généralement utilisées dans

Code laboratoire	Localisation	Profondeur (cm)	Age radiocarbone (^{14}C yr BP)	Age calibré à 2σ (cal yr BP)	Age calibré à 2σ (cal yr AD)
Poz-38607	Francaltroff (FRA)	130	1200 ± 40BP	[1004;1260]	[690;946]
Poz-38608	Francaltroff (FRA)	190	1620 ± 80BP	[1350;1704]	[246;600]
	Francaltroff (FRA)	240	2425 ± 45BP	[2356;2677]	[-406;-727]
	Francaltroff (FRA)	330	3260 ± 35BP	[3444;3556]	[-1606;-1494]
	Francaltroff (FRA)	410	4830 ± 80BP	[5471;5651]	[-3521;-3701]

Tableau 5.3 - Datations radiocarbone AMS de la séquence du bas-marais de Francaltroff (FRA) calibrées à l'aide de l'IntCal09 et du logiciel Calib 6.0.1 (Reimer *et al.*, 2009)

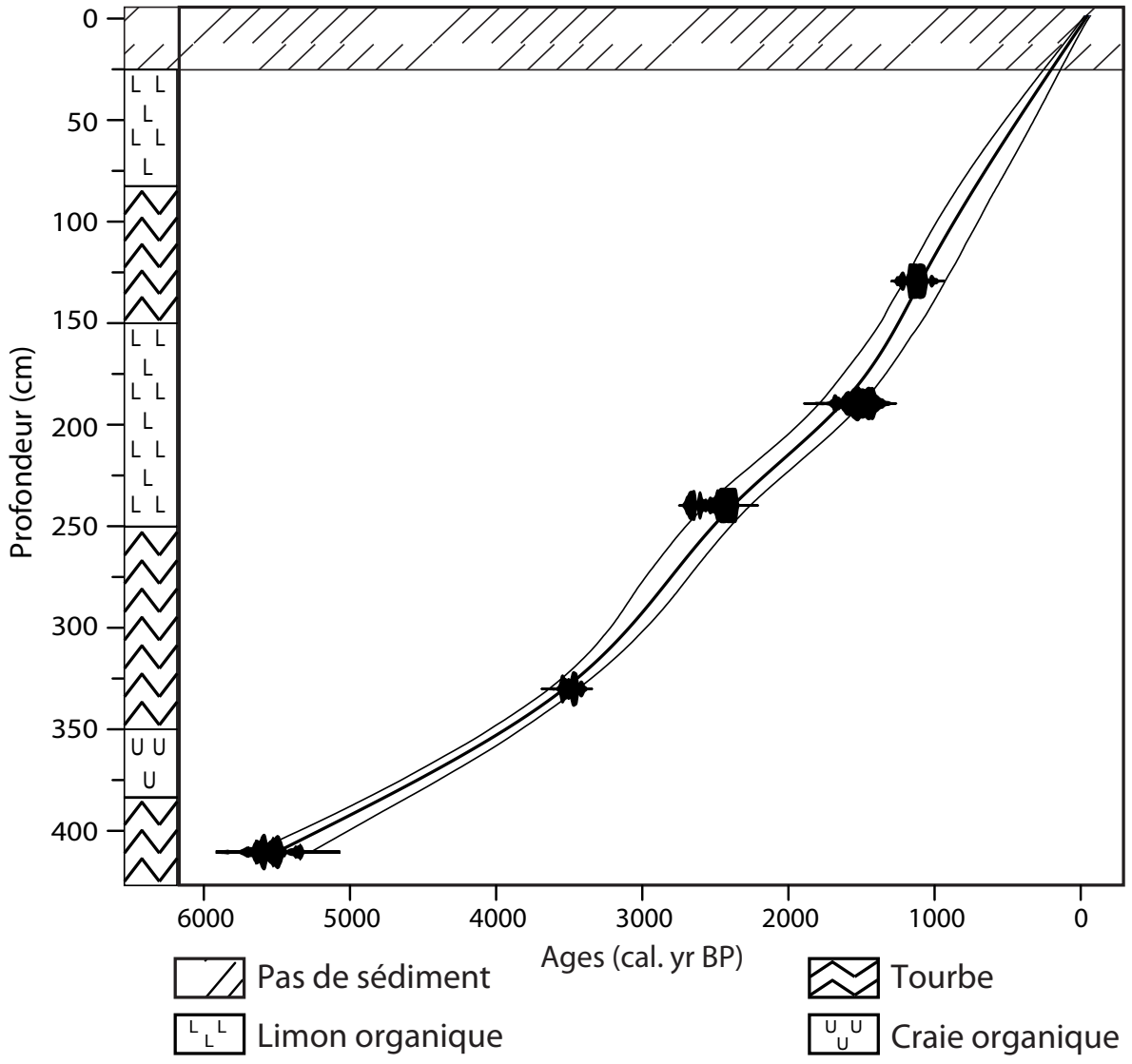


Figure 5.11 - Log stratigraphique du bas-marais de Francaltroff (FRA) et modèle âge profondeur de la même séquence sédimentaire construit à l'aide du logiciel Clam (Blaauw, 2010) et suivant la méthode *spline*.

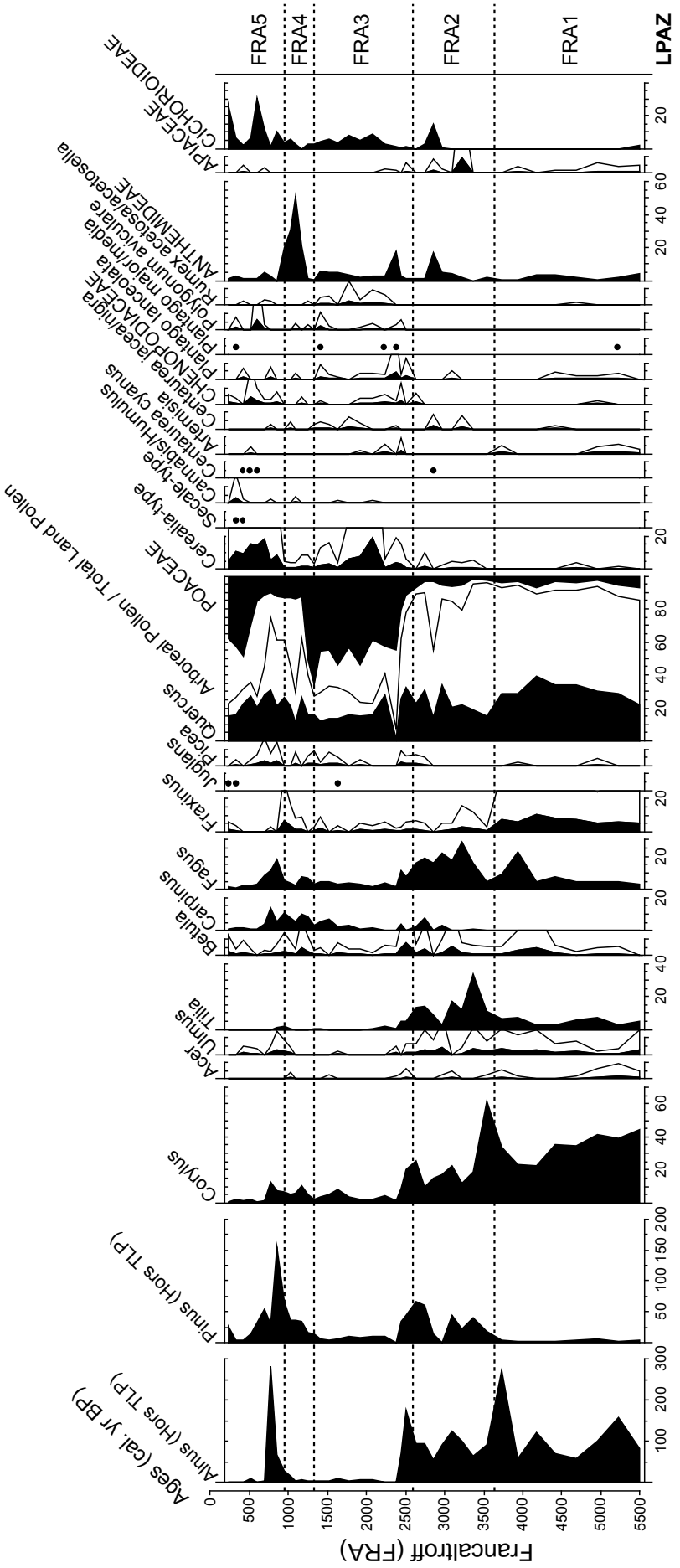


Figure 5.12 - Diagramme pollinique simplifié de la séquence de Francaltroff exprimé en âge (cal. yr BP). Les courbes d'exagération (en clair) correspondent à un facteur multiplicateur de 5. Les abbréviations AP/T correspond à Arboreal Pollen / Total Land Pollen et LPAZ à Local Pollen Assemblage Zone.

d'autres études polliniques. L'analyse pollinique a été réalisée par Pascale Ruffaldi, et de nouvelles datations radiocarbone (Tab. 5.3) ont récemment été effectuées dans la partie supérieure de la séquence afin de proposer un modèle âge-profondeur acceptable mais encore perfectible (Fig. 5.11). Nous avons volontairement limité le diagramme pollinique ici présenté aux 5000 dernières années, afin de se focaliser sur la dynamique et l'intensité de l'anthropisation des paysages dans cette région depuis la fin du Néolithique (Fig. 5.12).

Des études polliniques antérieures en Lorraine (Ruffaldi, 1999) décrivent les premières traces d'agriculture et le développement de la Néolithisation dans cette région. À Francaltroff, les traces d'anthropisation au cours du Néolithique moyen et final (FRA1) sont très faibles, sporadiques, et identifiées par quelques indices d'agriculture (*Cerealia*-type) et d'anthropisation (*Artemisia*, Chenopodiaceae, *Plantago lanceolata*, *Plantago major/media*) mais ne sont pas associées avec des défrichements de la chênaie mixte (*Acer*, *Fraxinus*, *Quercus*, *Tilia* et *Ulmus*). Ce type d'impact faible et sporadique et n'affectant pas ou peu le couvert forestier environnant est courant dans les études polliniques décrivant l'anthropisation au cours du Néolithique (Galop, 1998).

A partir de l'âge du Bronze et particulièrement au Bronze moyen et récent (FRA2), les premiers défrichements sont enregistrés sur *Fraxinus*, *Fagus* et *Quercus* coincident avec une diminution du rapport AP/T. La diminution du pourcentage de *Corylus* opposé à celui de *Pinus* pourrait correspondre à un changement de la végétation implantée sur le bas-marais. Les occurrences jusqu'alors sporadiques de *Cerealia*-type deviennent continues mais les indices d'anthropisation (*Centaurea cyanus*, *Plantago lanceolata*, *Centaurea jacea*) restent très faibles.

A partir de 2400 cal. B, au cours du premier âge du Fer (l'Hallstatt, FRA3), le rapport AP/T diminue rapidement avec la quasi-disparition des pollens arboréens de *Tilia*, *Fagus* et *Ulmus* et l'explosion des pollens de graminées, des plantes cultivées (*Cerealia*-type) et des indices d'anthropisation (*Artemisia*, *Centaurea jacea/nigra*, Chenopodiaceae, *Plantago lanceolata* et *Rumex acetosa/acetosella*). Au cours du second âge du Fer (La Tène) et la période Gallo-romaine (FRA3), les pratiques agro-pastorales s'intensifient ceci se traduisant par un pic de *Cerealia*-type et de *Rumex acetosa/acetosella*. Le début du Haut Moyen Age (FRA3) correspond à une période de diminution de cette pression anthropique et une légère reprise forestière par *Carpinus*. Toute cette période de forte anthropisation (FRA3) coïncide avec la disparition d'*Alnus* et de *Pinus* et le passage d'une sédimentation tourbeuse (FRA1 et FRA2) à une sédimentation limono-organique certainement due à l'érosion des sols, et plus particulièrement des limons de plateau, par les pratiques agro-pastorales implantées sur le bassin versant du bas-marais de Francaltroff.

La suite de la séquence est pour le moment moins bien datée, toutefois les données polliniques démontrent (FRA4) une chute rapide de l'anthropisation à partir de 700 cal. BP avec la disparition rapide des graminées, des céréales et de l'ensemble des indices polliniques d'anthropisation.

Le rapport AP/T passe de 35 à 75% avec une reprise forestière par *Betula* et *Corylus* et le développement des essences de la chênaie-charmaie-hêtraie (*Fraxinus*, *Carpinus*, *Fagus* et *Quercus*). La sédimentation du bas-marais redevient tourbeuse alors qu'*Alnus* et *Pinus* s'y développent à nouveau.

Après cette courte reforestation des paysages, le milieu semble être à nouveau anthropisé (*Cerealia*-type, Chenopodiaceae) à partir de 950 cal. BP (FRA5) mais de façon plus certaine sur le bassin versant du bas-marais à partir de 750 cal. BP avec la disparition d'*Alnus*, le retour à une sédimentation limono-organique, et l'expansion des pratiques agraires (*Cerealia*-type) et l'apparition de nouvelles espéces cultivées (*Secale*-type, *Cannabis/Humulus*) conforté par des indices polliniques d'anthropisation tels que des Chenopodicaeae, des Cichoiroideae et *Polygonum aviculare*.

3. Discussions

3.1 D'un paysage pastoral antique à l'agriculture médiévale, du terroir à la révolution agricole ?

Nos résultats décrivent des paysages très ouverts (AP/T à environ 40%) et très anthropisés pendant l'antiquité (Age du Fer et période Gallo-romaine) et la période du Moyen Age classique. Toutefois la valorisation et l'utilisation du sol semble dominée, à la période antique, par une pratique pastorale intensive et une pratique agraire secondaire (faibles scores du premier axe de l'ACP et faibles pourcentages de pollen de *Cerealia*-type), à l'opposé de la période médiévale caractérisée par un développement des pratiques agricoles et la diversification des cultures céréalières (scores important sur le premier axe avec de 10 à 20% de pollen de *Cerealia*-type). Ce changement des pratiques agro-pastorales entre l'antiquité et la période médiévale peut être interprété comme (1) une spécialisation de la production agro-pastorale suivant les conditions pédologiques locales dans un contexte potentiel d'échanges commerciaux régionaux à l'antiquité ; et par la suite (2) à un effet des changements de techniques agricoles et l'expansion de nouvelles cultures céréalières à l'époque médiévale.

A l'époque Gauloise et Romaine, les sols sont travaillés à l'aide d'araires (*aratum*), creusant des sillons peu profonds dans lesquels l'amendement (organique ou minéral) et les semences (orge, épeautre) sont directement répandus. Les espèces céréalières cultivées sont généralement des céréales estivales telles que l'épeautre et l'orge. Le seigle étant considéré à cette époque comme « une nourriture très pauvre, utile seulement pour éviter la famine » suivant les sources de Pline l'Ancien.

Au cours du Moyen Age, certains historiens parlent d'une *révolution agricole médiévale* imputée à de nombreux changements tels que l'amélioration des outils et des techniques agraires (Duby,

1954) et des conditions climatiques plus favorables (*Medieval Warm Period*) (Millet *et al.*, 2009 ; Magny *et al.*, 2011). L'utilisation de la charrue, du harnais et de la méthode des sillons-billons a certainement eu un impact favorable sur la capacité de valorisation des sols lourds dont l'hydromorphie freinait la mise en valeur agricole. Le développement de la culture hivernale du seigle, planté mi-septembre environ, augmente également la production agricole sur des superficies agraires identiques.

Cette expansion de l'agriculture pendant le Moyen Age classique est décrite dans de nombreuses études paléo-environnementales en Europe de l'Ouest (Stobbe, 1996 ; Tinner *et al.*, 2003 ; Gauthier, 2004 ; Enters *et al.*, 2008 ; Rius *et al.*, 2009). Pour nos séquences, un essor agricole et d'importants défrichements sont enregistrés entre 1000 et 950 BP (950/1000 AD) avec l'expansion de la culture de céréales (*Cerealia*-type) ainsi que celle du chanvre (*Cannabis/Humulus*) et du seigle (*Secale*-type). A Saint Jean, des défrichements ainsi que l'essor agricole sont enregistrés dès 1450 BP (500 AD) au début du Haut Moyen Age. La culture du chanvre y est d'ailleurs attestée au moins depuis 1400 BP (550 AD) puisque deux pics de *Cannabis/Humulus*, correspondant à une pratique du rouissage, sont enregistrés à cette époque à Assenoncourt et à St. Jean.

Les sols et leurs caractéristiques hydriques dans notre zone d'étude sont très influencés par l'épaisseur des limons acides déposés sur les marnes (argiles lourdes) du Keuper. Les différences de techniques agraires entre l'antiquité et la période médiévale ont certainement influencé la valorisation de nouvelles terres permettant de mieux réguler l'hydromophie des sols et ainsi augmentant la superficie des terres exploitables pour la culture céréalière (Poulsen, 1997) ; et également en modifiant le développent des plantes annuelles (graminées) et des adventices modifiant le cortège floristique, et donc l'image pollinique, associé aux champs (Rasmussen, 2009).

3.2 Anthropisation et création des mardelles

L'utilisation de nos petits capteurs sédimentaires s'est révélée optimale afin de reconstituer les modifications d'usage de ces sols forestiers. La comparaison de toutes nos séquences polliniques appuyée par l'Analyse en Composante Principale (ACP) permet de séparer les grandes périodes d'anthropisation à des échelles « régionales » et « locales ».

Ces travaux démontrent que c'est seulement à partir du second âge du Fer que se développe un modelage à grande échelle des paysages sur le Plateau lorrain, avec une superficie forestière certainement plus faible que celle observée aujourd'hui, et caractérisé par une intense activité agro-pastorale se pérennisant jusqu'à la fin de l'Antiquité précoce. La création de nos « mardelles » (*cf. Chapitre 3*) coïncide avec cette période d'importants défrichements et de valorisation des sols par

les pratiques agro-pastorales. Ces résultats sont en phase avec les travaux d'archéologues lorrains travaillant sur les plateaux calcaires (Forêt de Haye, Nancy) (Georges-Leroy *et al.*, 2009) ou sur les sommets des Vosges gréseuses (Saverne, Walsheid) (Georges-Leroy et al., 2007 ; Goubet & Meyer, 2005 ; Heckenbenner & Meyer, 2004) qui mettent au jour depuis plusieurs années de nombreuses indices (habitats, parcellaires) de l'occupation antique de ces forêts longtemps considérées comme « anciennes ».

Par la suite, certaines zones seront ré-ouvertes dès le Haut Moyen Age (St. Jean) alors que la plupart des espaces subiront une valorisation plus tardive, au cours du Moyen Age classique, dans une dynamique globale d'expansion des défrichements et de la culture céréalière (seigle, blé, orge et chanvre). L'amélioration des techniques et outils agraires favorise la mise en valeur de nouveaux sols et généralise la potentialité d'agriculture céréalière même sur des sols aux propriétés hydriques défavorables.

Ainsi, la mise en place des massifs forestiers dans lesquels nos structures sont actuellement implantées ne datent certainement que du 16ème siècle (400 cal. BP). Il suit un besoin industriel de mise en place de réserves sylvicoles pour les Salines de Dieuze. La proportion des essences forestières actuelles semble largement influencée par les traitements et les besoins sylvicoles favorisant le chêne de façon quasiement monospécifique dans l'étage dominant. Historiquement, comme l'on peut le voir sur la séquence de Sarrebourg entre 1550 et 1250 cal. BP, les proportions de charmes ont pu être plus importantes au sein des peuplement forestiers.

Chapitre 6

Influences des pratiques agraires antiques et médievales sur les flux d'érosion et la distribution des sols



Document de couverture du chapitre

Photographie des carottes sédimentaires extraites à l'aide d'une sonde manuelle des mardelle de Sarrebourg, du Römersberg et de Saint Jean. Clichés de Pascale Ruffaldi.

1. Introduction

Une des hypothèses proposée pour la création de ces mardelles est liée, sur les marnes du Keuper inférieur du moins, à une exploitation du socle géologique pour un épandage de la marne extraite sur les sols environnants (Vanwalleghem *et al.*, 2006b ; *cf. Chapitre 3*). L'absence systématique du matériel excavé autour de la mardelle et leur localisation au sein d'anciens parcellaires agraires (*cf. Chapitre 4*) sont des arguments étayant cette hypothèse.

Le marnage est une technique d'amendement des sols consistant à épandre une certaine quantité de marne sur des terres arables afin d'en améliorer les potentialités agronomiques (richesse en $CaCO_3$ et texture). *Pline l'Ancien* (Livre 17, Histoire Naturelle) décrit au cours du Ier siècle ap. J.-C., l'utilisation « traditionnelle » de différentes marnes (blanche, rousse, colombine, argileuse, tophacée et sablonneuse) en Gaule et en Grande-Bretagne afin d'améliorer la production des céréales (épeautre, orge chevelu) ou celle des fourrages.

Le marnage était donc potentiellement connu et utilisé à la période historique de la création des mardelles sur le Plateau lorrain (*cf. Chapitre 3*) dans un contexte régional de forte anthropisation des paysages et d'intenses pratiques agro-pastorales (*cf. Chapitre 5*). La pérennité de ces amendements serait de 30 à 50 ans suivant la nature de la marne et le type de sol amendé, généralement des sols acides et lourds.

Les limons de plateaux (LP) sont justement des formations acides qui recouvrent de grandes superficies en Lorraine, sur des contextes géologiques très différents, dont les marnes irisées du Keuper inférieur (BRGM, 2001). Les caractéristiques pédologiques sont très influencés par cette couverture limoneuse. Luvisols Rédoxiques (LuRe) pour les sols possédant plus d'un mètre de limons, des Rédoxisols (Re) pour des épaisseurs de limons de moins de 50 cm, des Pélosols Différentiés (PeDi) pour des épaisseurs de 25-30 cm de limons et des Pélosols (Pe) dans les cas où la marne est affleurante. Les potentialités agronomiques de ces sols sont également liées à l'épaisseur de ces limons. Ils influencent la profondeur du sol, la réserve utile en eau et la pérennité de l'hydromorphie.

Certaines études ont recherché un lien entre les implantations agraires antiques et les épaissseurs de limons (Vannière, 2001 ; Maussion, 2004). Toutefois, les limons sont des matériaux meubles et fins particulièrement sensibles à l'érosion (Duchaufour, 1983 ; Querrien *et al.*, soumis). Dès lors, les pratiques agro-pastorales antiques et médievales ont pu provoquer l'érosion d'une partie des dépôts originels de limons. Ainsi, Le Tacon (1966) constate dans les Vosges (Bellefontaines) des épaisseurs des horizons E (eluviaux) sur limons qui sont très variables et qu'il justifie par une troncature hypothétiquement anthropique.

Les travaux de Houben (2008) et Enters *et al.* (2008) proposent des méthodes afin de quantifier le stock de sol végétal érodé sur un bassin versant, au cours des temps historiques, et une vision

de la cartographie pédologique « initiale » de ces régions.

Au cours de ce chapitre, nous nous attèlerons tout d'abord à des questions globales sur (1) l'origine de ces dépôts limoneux et sur leur disposition topographique. Puis nous nous focaliserons (2) sur les relations entre topographie, épaisseur actuelle des limons et mardelles puis (3) nous tenterons de quantifier les érosions potentielles en relation avec les pratiques anthropiques protohistoriques, romaines et médiévales, avant (4) de caractériser la granulométrie des remplissages sédimentaires.

2. Résultats et interprétations

2.1 Origine des limons de plateau

La carte géologique de la Moselle (BRGM, 2001) illustre la présence « *d'importants placages de limons [...] sur toutes les formations affleurantes* » du Plateau lorrain. Ces limons de plateau (LP) « *argileux ou argilo sableux sont très fins, de teinte jaunâtre* ». Dans la littérature, deux origines sont proposées pour les limons de plateaux (LP). Il pourrait s'agir d'un matériau éxogène (dépôts éoliens würmiens) comme le propose les travaux de Jamagne (& Mathieu, 1971 ; 1973) sur les limons du Bassin parisien. Ces limons pourraient également être des dépots résiduels de remaniement sur place ou de transport à faible distance (Clozier, 1926). Dans la partie est du Bassin parisien, les dépôts sont plus superficiels, n'ont pas les caractéristiques des loess et n'ont pas donné lieu à des études approfondies (Le Tacon, 1966). Pour le BRGM (2001), il s'agit de matériaux provenant « *de l'altération des formations géologiques sous-jacentes* ».

Nous avons pu bénéficier grâce à Y. Lefevre (EEF, INRA Nancy) d'une carte des inventaires pédologiques des forêts Domaniales du Pays des étangs (Albestroff, Belle Forêts, Fénétrange, Languimberg et Sarrebourg), soit 869 placettes. Il s'agit d'une cartographie réalisée dans le cadre de la révision des aménagements de ces forêts par l'ONF. Cette étude est également liée à la problématique de sols réputés comme difficiles (sols limoneux à engorgement temporaire très marqués car mal drainés) et de dépérissement du chêne pédonculé. Cette cartographie identifient montrent des épaisseurs de limons très variables pouvant aller localement jusqu'à près de 2 m (Fénétrange, parcelle 108). Des fosses ouvertes sur ces profils permettent de prélever des échantillons de limons et de marnes à partir du socle géologique jusqu'à la surface. Ces prélèvements ont été envoyés au Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques (CRPG, Nancy) pour une analyse de l'ensemble des éléments majeurs.

L'idée de cette analyse était de rechercher un élément que l'on retrouve dans les marnes mais absent des limons de plateau qui pourrait servir de traceur d'un épendage éventuel de la marne en surface. Mais les résultats démontrent une grande homogénéité entre les deux matériaux (limon et marne), les différences étant généralement liées à la charge carbonatée de la marne ayant la

capacité de fixer certains éléments, par exemple le Strontium (Sr). Toutefois, les concentrations en Zirconium (Zr) se révèlent être beaucoup plus fortes dans les limons (330-440 ppm) que dans la marne (70-90 ppm). Le Zircon est un minéral du groupe des silicates présentant une dureté relative élevée (6,5 à 7,5 sur l'échelle de Mohs). La présence de ce minéral dans les limons de plateau, et son absence dans la marne, corrobore l'hypothèse d'un apport éolien de ce matériel limoneux lors des dernières glaciations au cours du Pleistocène.

2.2 Relations topographie, épaisseur des limons et localisation des mardelles

2.2.1 Epaisseurs des limons, orientations des versants et topographie

Selon Goossens (1988), les différences d'épaisseur des limons observées actuellement peuvent être liées à une logique de dépôt suivant l'orientation des versants. Pour tester cette hypothèse, nous utilisons des cartes pédologiques levées sur les triages forestiers de Mittersheim, du Römersberg et de Parroy (30 km à l'est de Nancy, en Meurthe-et-Moselle, *cf. Chapitre 1*) provenant du travail de terrain d'agents ONF locaux (C. Fischer, F. Ritz, V. Etienne) puis digitalisées sous SIG (Système d'Information Géographique).

À Mittersheim, la confrontation de la carte pédologique avec les lignes de niveau et la carte d'orientation des versants (fonction *Aspect* de *Spatial Analyst*) illustre très clairement une dichotomie de versants avec des épaisseurs de limons plus importantes (< 50 cm) sur les versants orientés nord/nord-est/est et plus faibles voir nulles (> 30 cm) sur les versants orientés Sud/sud-ouest/ouest (Fig. 6.1).

Les zones forestières de Parroy (Fig. 6.2) et du Römersberg (Fig. 6.3) présentent des différences altitudinales plus marquées que sur le massif de Mittersheim. On ne perçoit pas sur ces deux massifs de logique d'épaisseur des limons suivant l'orientation des versants. Il existe plutôt une disposition en relation avec la topographie avec des limons épais sur les sommets et des limons peu épais ou une marne affleurante sur les points bas. Sur ces deux massifs forestiers, les épaisseurs de limons sont mêmes plus importantes sur les versants sud/sud-est, à l'opposé des résultats obtenus à Mittersheim. L'existence d'un dépôt préférentiel lié à l'orientation des versants existe sur certaines micro-zones géographiques mais ne peut être généralisé à l'ensemble de notre zone d'étude.

2.2.2 Localisation des mardelles selon la topographie

Le travail réalisé sur les images LiDAR IGN démontre une disposition préférentielle des mardelles sur les sommets ou les hauts de pente (*cf. Chapitre 4*). Sur la forêt Domaniale du Römersberg, un inventaire non exhaustif des mardelles (Etienne, 2007) pointent des structures implantées sur les deux versants, orientés nord/nord-ouest et sud/sud-est.

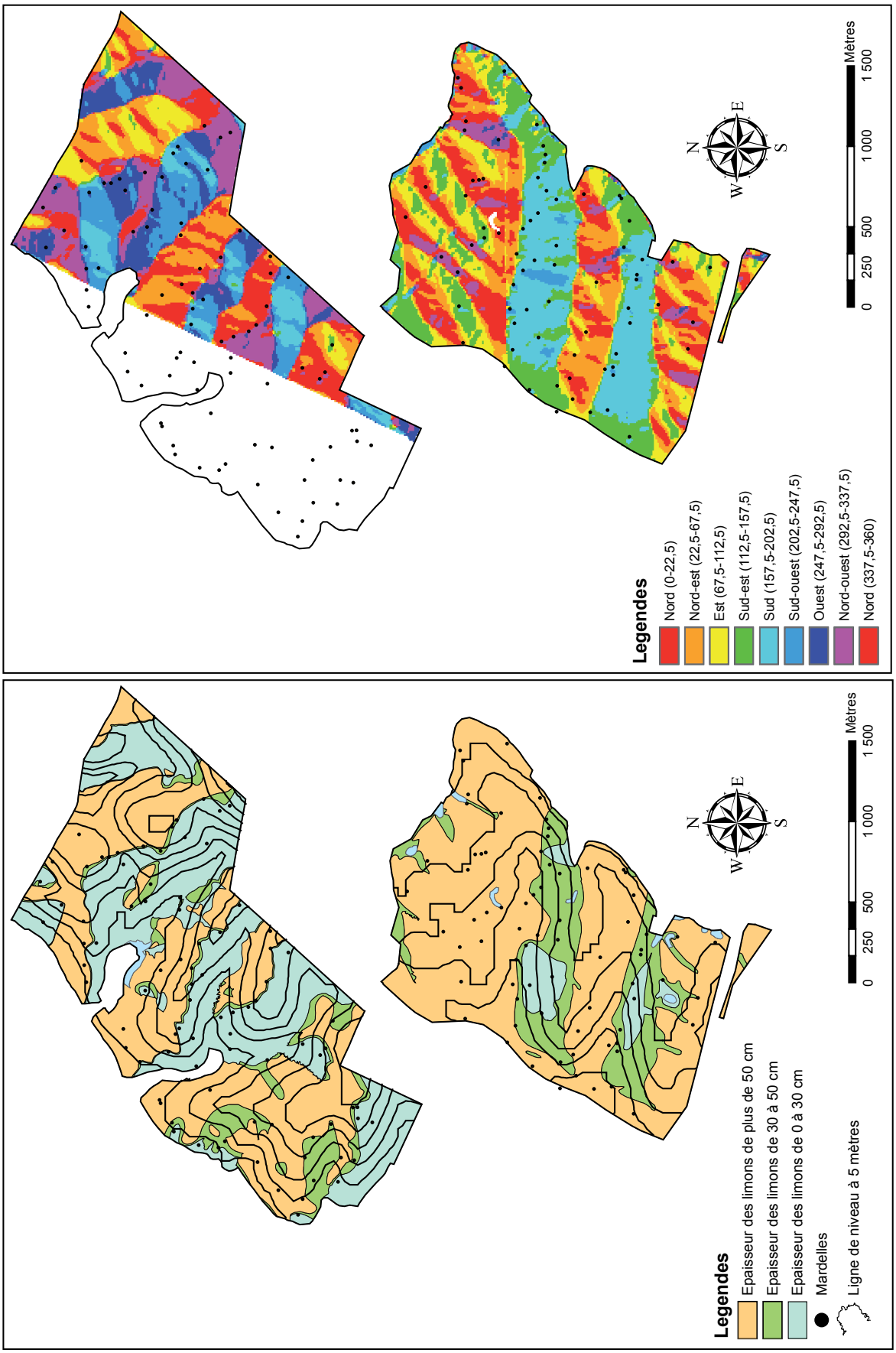


Figure 6.1 - Carte pédologique du triage forestier de Mittersheim sur laquelle sont superposées la localisation des mardelles et les courbes de niveaux espacées de 5 m (a), et la carte d'orientation des versants obtenue sous SIG sur la même zone (b).

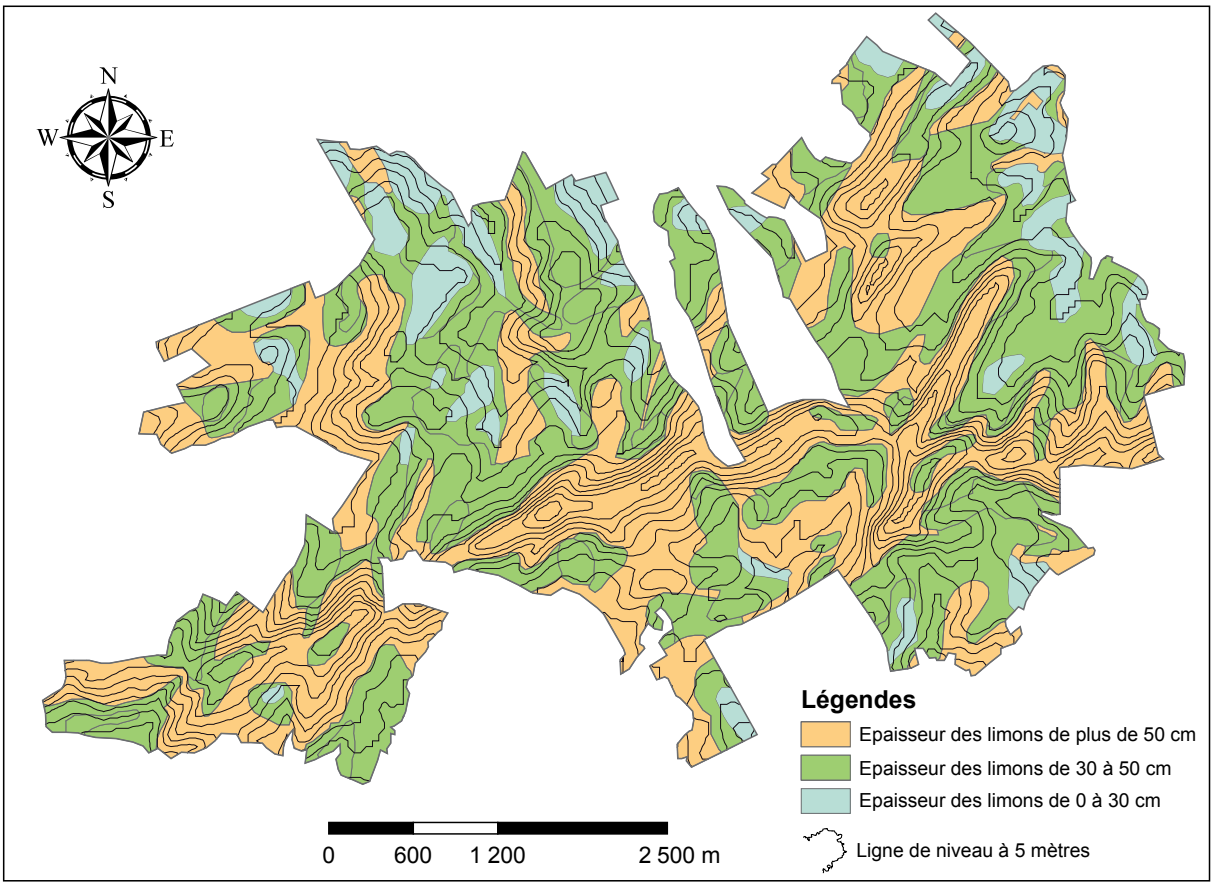


Figure 6.2 - Carte pédologique de la forêt Domaniale de Parroy (Meurthe-et-Moselle, Lorraine) sur laquelle fut superposée les courbes de niveaux espacées de 5 m.

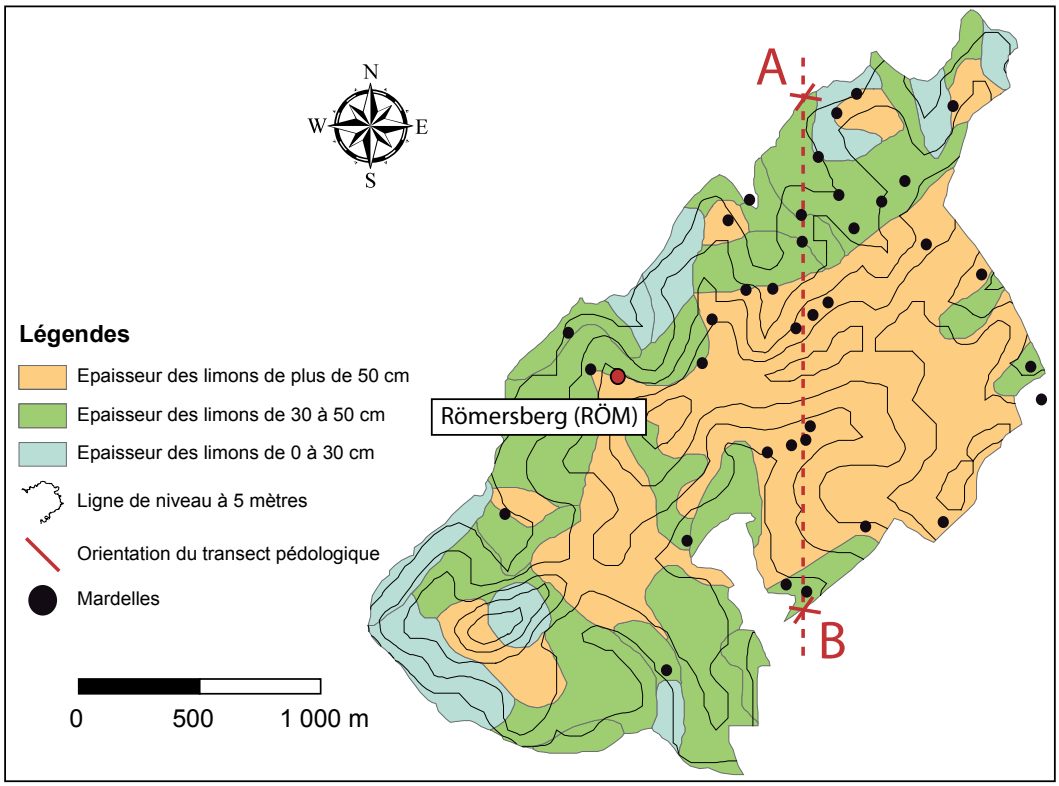


Figure 6.3 - Carte pédologique de la forêt Domaniale du Römersberg sur laquelle sont superposées la localisation des mardelles inventoriées, dont celle du Römersberg (RÖM) présentée dans ce document, et les courbes de niveaux espacées de 5 m.

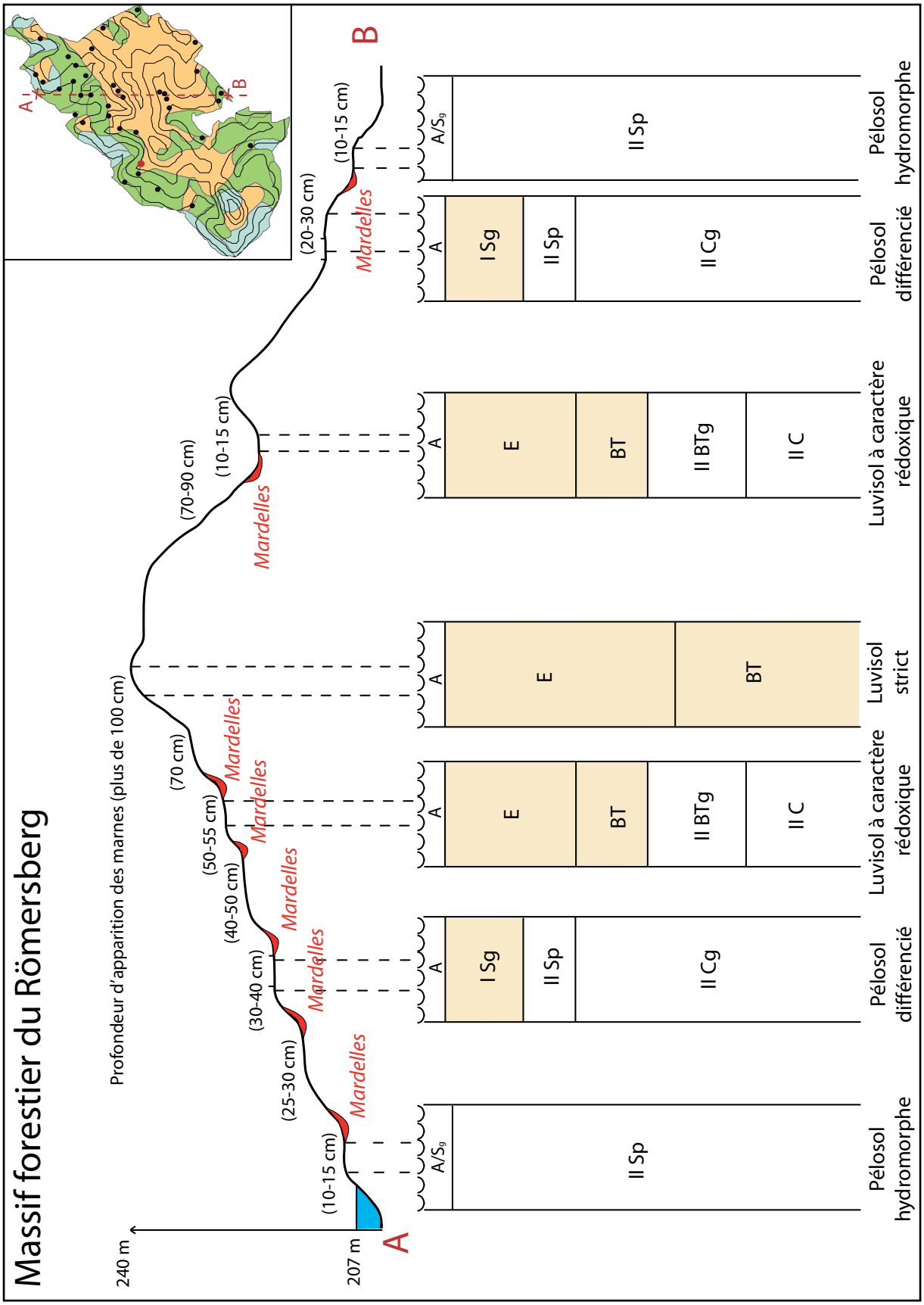


Figure 6.4 - Carte topographique des types de sols existants sur le massif forestier du Römersberg extrait de Etienne (2007) et de Brethes (1976). Les mardelles sont situées d'un point de vue topographique à des limites de terrasses le long des versants et d'un point de vue pédologique à des limites d'épaisseurs de limons et donc à des transitions de types de sols.

Ce massif du Römersberg présente une topographie asymétrique (Fig. 6.4), avec un versant Nord caractérisé par une formation de plateau ondulé formée de dômes convexes et de zones de replats du sommet jusqu'au bord de l'étang de Lindre ; et un versant Sud présentant une topographie avec des pentes plus fortes et une cuvette à mi-versant, avant une formation en dôme et replats en bas de versant. La profondeur d'apparition des marnes, et donc l'épaisseur des limons de plateau, diminue à chaque transition entre une phase « d'ondulation » et de replat topographique et c'est précisément en aval de ces ruptures de pentes que sont positionnées les mardelles sur le versant.

Ces « ruptures de pente » (Fig. 6.5) ressemblent aux parcellaires identifiés grâce aux images LiDAR sur le secteur de Fénétrange (*cf. Chapitre 4*). Sur le massif Römersberg, non couvert par les images LiDAR LGV ou IGN, les mardelles seraient donc également placées en bordure de terrasses ou de parcellaires anciens et donc en amont de délimitation de champs anciens. Dans son article, Delafosse (1948) propose une photographie d'une mardelle intra-forestière localisée dans la forêt de Flatten (à l'est de Sierck, nord-Moselle) (Annexe 17). Cette photographie et très proche de celle réalisée en forêt du Römersberg (Guermange, sud-Moselle). On discerne également sur la photographie de Delfosse la présence d'un ondulation de terrain en amont de la mardelle qui pourrait ressembler à un tallus de parcellaire.

Cette observation de la localisation des mardelles au niveau de « ruptures de pentes », et d'une épaisseur de limons plus importante en amont de la mardelle qu'en aval, est également perceptible sur la carte pédologique de Mittersheim (*cf. Fig. 6.1*) et confirmée sur les forêts domaniales d'Albestroff, de Fénétrange et de Sarrebourg par les observations de terrain d'Yves Lefèvre (communication personnelle).

2.2.3 Localisation des mardelles selon le contexte pédologique

Pour tester la répartition des mardelles suivant les types de sols, nous utilisons la carte pédologique levée sur les forêts domaniales d'Albestroff, de Belle Forêts, de Fénétrange et de Sarrebourg fournie par Y. Lefevre. Cette carte pédologique recoupe en partie nos inventaires de mardelles levés grâces aux images LiDAR IGN (304 structures sur 791) et LiDAR LGV (224 structures sur 580) ainsi que les inventaires de Fénétrange (Ramm, 1999) (185 structures sur 281) et de Mittersheim (88) soit 821 mardelles.

Ces données démontrent que l'on retrouve autant de dépressions sur des Luvisol Rédoxisol (43%) que sur des Pélosol Différencié (42%), le reste des structures étant localisé sur des Rédoxisol (13%). Puisque ces trois types de sols sont les plus représentés dans notre fenêtre d'étude, nous obtenons des densités proches que ce soit pour les Luvisol Rédoxique (26,16 km² soit 45,3% ; 13,2 CD par km²), les Pélosol Différencié (22,10 km² soit 38,3% ; 15,3 CD par km²) ou les

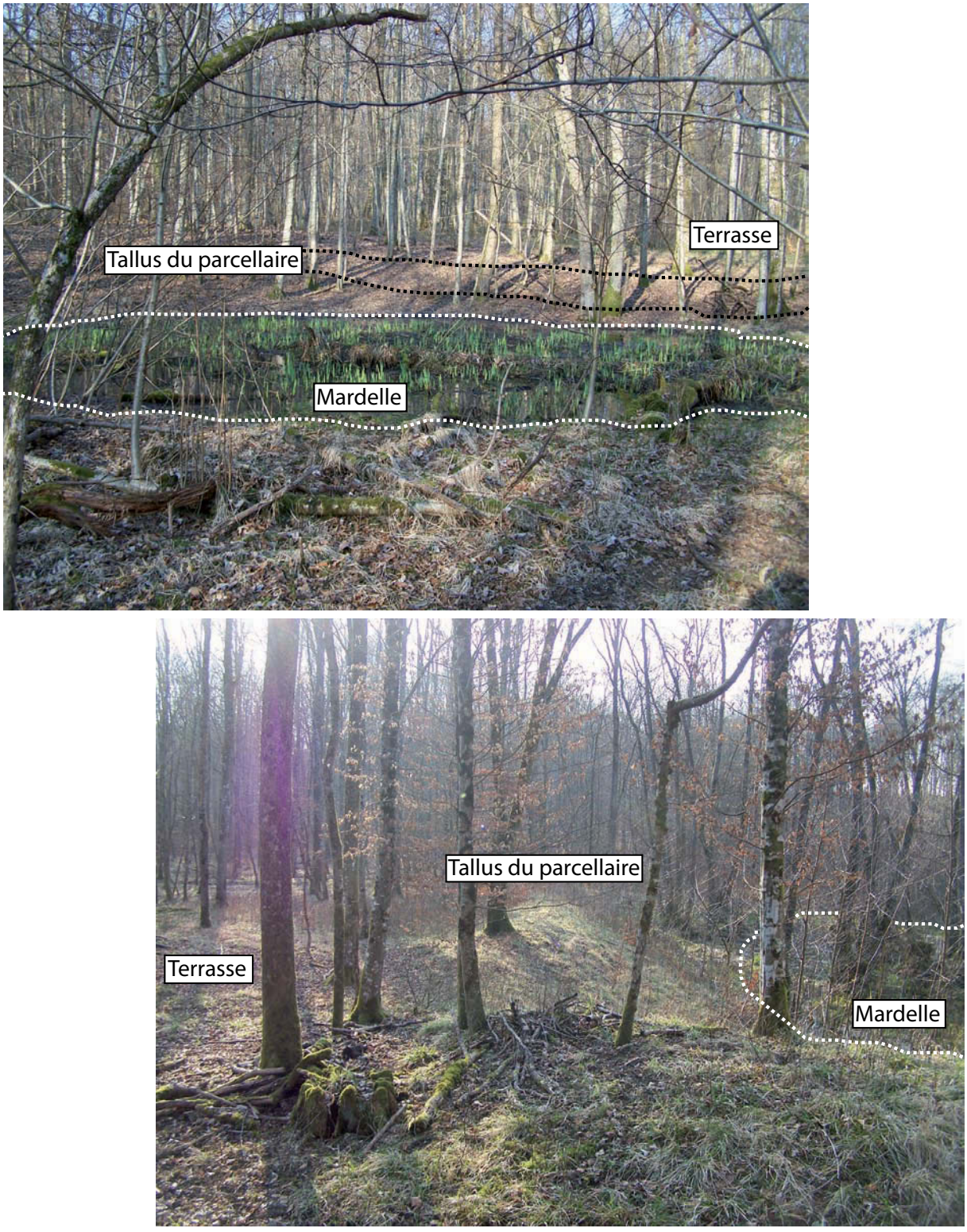


Figure 6.5 - Photographies d'une mardelle localisée sur le massif du Römerberg et illustrant la disposition sur les versants de ce massif forestier en aval de ruptures de pentes formant en amont et en aval des terrasses délimitées par le tallus d'un parcellaire. Clichés de Frédéric Ritz (ONF).

Rédoxisol (7,55 km² soit 13,1% ; 13,4 CD par km²). Si l'on compare la localisation des mardelles selon les épaisseurs de limons regroupés en deux catégories, (1) plus d'un mètre de limon et (2) moins de 50 cm de limons ; on obtient (1) 368 CDs sur 27,04 km² soit 13,6 CDs par km² ou (2) 451 CDs sur 30,72 km² soit 14,7 CDs par km².

Une partie de la forêt Domaniale de Mittersheim a fait l'objet de relevés pédologiques par l'ONF et l'INRA mais également par C. Fischer, le garde ONF de ce triage. Si l'on compare ces deux cartes pédologiques (Fig. 6.6), on observe évidemment une différence d'échelle de précision entre ces deux cartes.
Sur cette petite zone en utilisant la carte pédologique de C. Fischer, on comptablise 22 mardelles (25%) sur les limons de plus de 50 cm, 42 mardelles (48%) sur les limons de 30 à 50 cm et 24 mardelles (27%) sur les limons de 0 à 30 cm. Une grande majorité (75%) des mardelles sont implantées, selon cette carte pédologique, sur des sols possédant une couverture limoneuse de moins de 50 cm.
Si l'on utilise celle fournie par Y. Lefevre, on obtient 13 structures (15%) sur Luvisol Rédoxique (> 1 m de limons), 27 structures (31%) sur les Néoluvisol Rédoxique (50 à 80 cm de limons) et 48 structures (54%) sur des Pélosol Différencié (25 à 30 cm de limons). Cette fois, la proportion de structures implantées sur des sols avec plus de 50 cm d'épaisseur de limons (46%) ou moins de 50 cm (54%), est quasiment équivalente.

Cette comparaison démontre que pour travailler sur une relation entre mardelle et type de sol, l'utilisation d'une carte pédologique à grande échelle ne se révèle pas être très pertinent. La carte de C. Fischer démontre d'ailleurs que ces mardelles se retrouvent souvent à des zones de transition entre deux épaisseurs de sols. Dès lors, aucune logique de leur implantation selon les épaisseurs des limons n'est perceptible mise à part leur absence sur les sols à marne affleurante (Pélosol strict).
Toutefois, les défrichements et la mise en culture de ces zones durant les périodes antiques et médiévales (*cf. Chapitre 5*) ont pu engendrer l'érosion d'une partie des matériaux limoneux de surface, modifiant la carte pédologique et l'épaisseur actuelle de limon.

2.3 Erosion des limons de plateau

L'étude des remplissages sédimentaires accumulé dans les mardelles permet d'évaluer le stock de sol végétal érodé depuis leur création, à partir du stock minéral sédimenté dans ces capteurs. Pour chaque séquence sédimentaire, la caractérisation des matériaux sédimentaires (Loss On Ignition, densité sèche) (*cf. Chapitre 2*) est couplée à une délimitation du bassin versant afin de

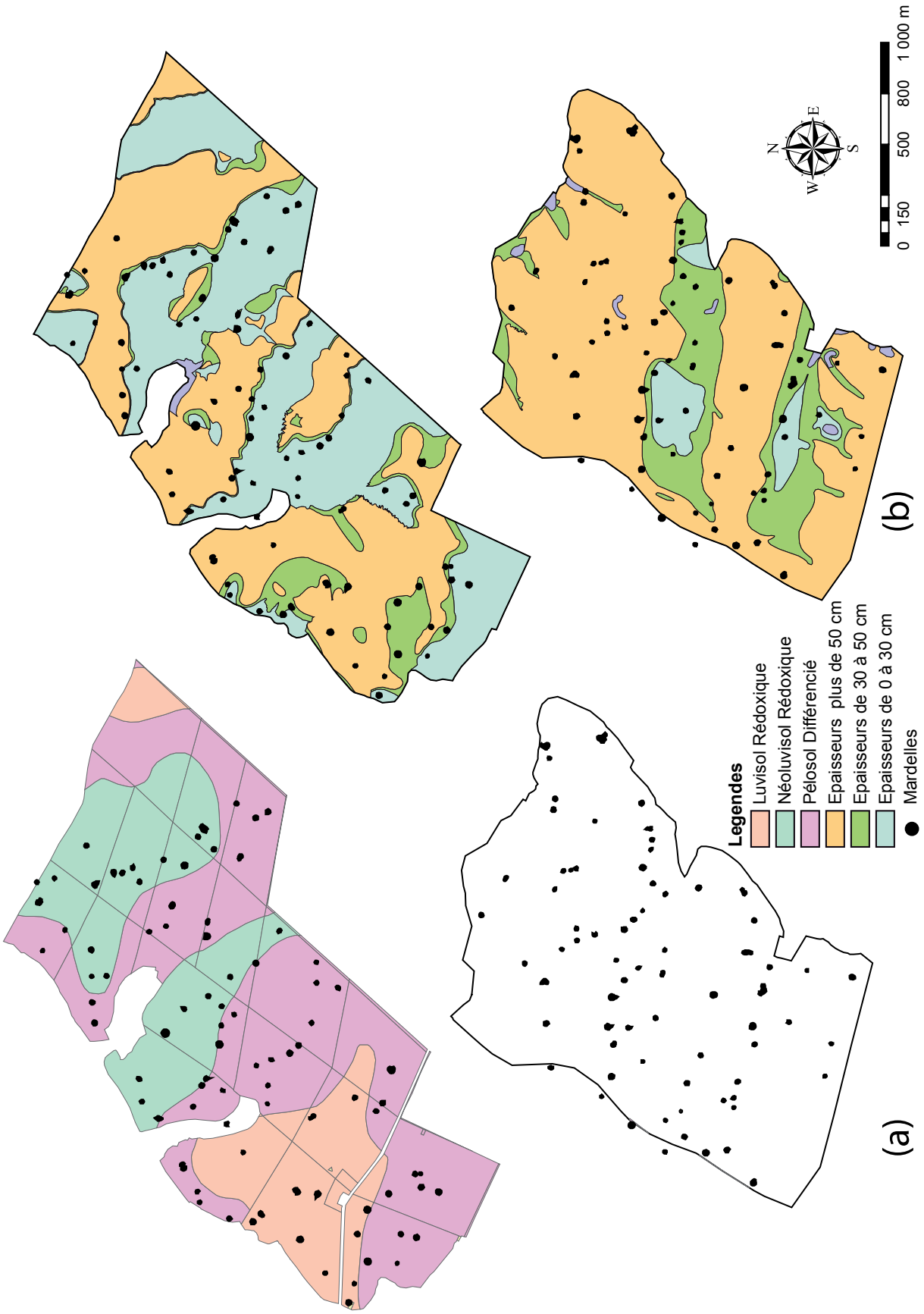


Figure 6.6 - Comparaison de (a) la carte pédologique fournie par Y. Lefevre (INRA-ONF) avec (b) la carte pédologique levée par C. Fischersur son triage forestier sur le secteur de la forêt Domaniale de Mittersheim. Les épaisseurs de limons sont, de plus d'un mètre sur Luvisol Rédoxique, 50-80 cm sur Néoluvisol Rédoxique et 25-30 cm sur Pélosol Différencié.

retranscrire ces flux en pertes de sols (mm/an). Les différentes étapes et les données nécessaires à ce calcul sont expliqués en Figure 6.7.
Cette méthode est testée sur les mardelles de Sarrebourg (SAR) et Bisping (BIS) car elles sont inclues dans la bande LiDAR LGV, dont la précision altimétrique permet de délimiter leurs bassins versants (BV). Les outils d'ArcGis étant inexploitable du fait de variations altitudinales trop faibles, les BVs seront délimités manuellement à l'aide de la carte d'orientation des versants générées sous Spatial Analyst (*aspect*) et des courbes de niveaux espacées de 5 m.
Cette reconstitution des érosions est également testée à Assenoncourt, car c'est cette séquences qui présentait, d'un point de vue pollinique, la plus forte anthropisation médiévale (*cf. Chapitre 5*). Mais puisque cette structure n'est pas intégrée dans nos fenêtres LiDAR LGN ou IGN, nous utiliserons un MNT reconstruis à partir des courbes de niveau à 5 mètres afin de délimiter approximativement son bassin versant. Cette délimitation du bassin versant sera évidemment moins précise que celle proposée pour les mardelles de Sarrebourg et Bisping.

Le principal biais lors des calculs de l'érosion des horizons pédologiques de surface, est lié à l'incertitude de la surface exacte de la zone de dépôt (la mardelle). Des prospections géophysiques permettraient de calculer précisemment ces stocks de sol déposés sur l'ensemble de la structure (*cf. Chapitre 3*).
Un diagramme pollinique d'anthropisation très simplifié (limité aux pourcentages de *Carpinus*, *Quercus*, AP/T et IPA+céréales) est présenté en parallèle des résultats de perte au feu (LOI), de densité séche (DS), et donc de perte de sol (en mm/an).

2.3.1 Mardelle de Sarrebourg (SAR)

La structure de Sarrebourg n'a pas fait l'objet de fouilles archéologiques. Aussi, la délimitation de sa superficie se base sur un profil de remplissage réalisé à l'aide de sondages manuels (*cf. Chapitre 3*). La surface de la structure est obtenue grâce aux images LiDAR LGV. La zone plane du remplissage sédimentaire recouvre selon la fourchette utilisée, de 490 à 625 m² de surface sur une hauteur de 285 cm. La taille du bassin versant est limitée et recouvre qu'environ 800 m² (Fig. 6.8).
La quasi-totalité de l'érosion est liée à la période d'anthropisation datée du second âge du Fer au début de la période Romaine. Il s'agit d'un période de 200 ans environ durant laquelle les pratiques agro-pastorales entraînent une érosion moyenne de 12 à 14 cm de sol sur le bassin versant de la mardelle de Sarrebourg (SARS1). Au cours de la période médiévale, cette zone reste enforestée (*cf. Chapitre 5*), l'érosion y est donc minime, de l'ordre de 3 à 4 cm, pour un bilan final de 15 à 18 cm en 2200 ans sur ce petit bassin versant.

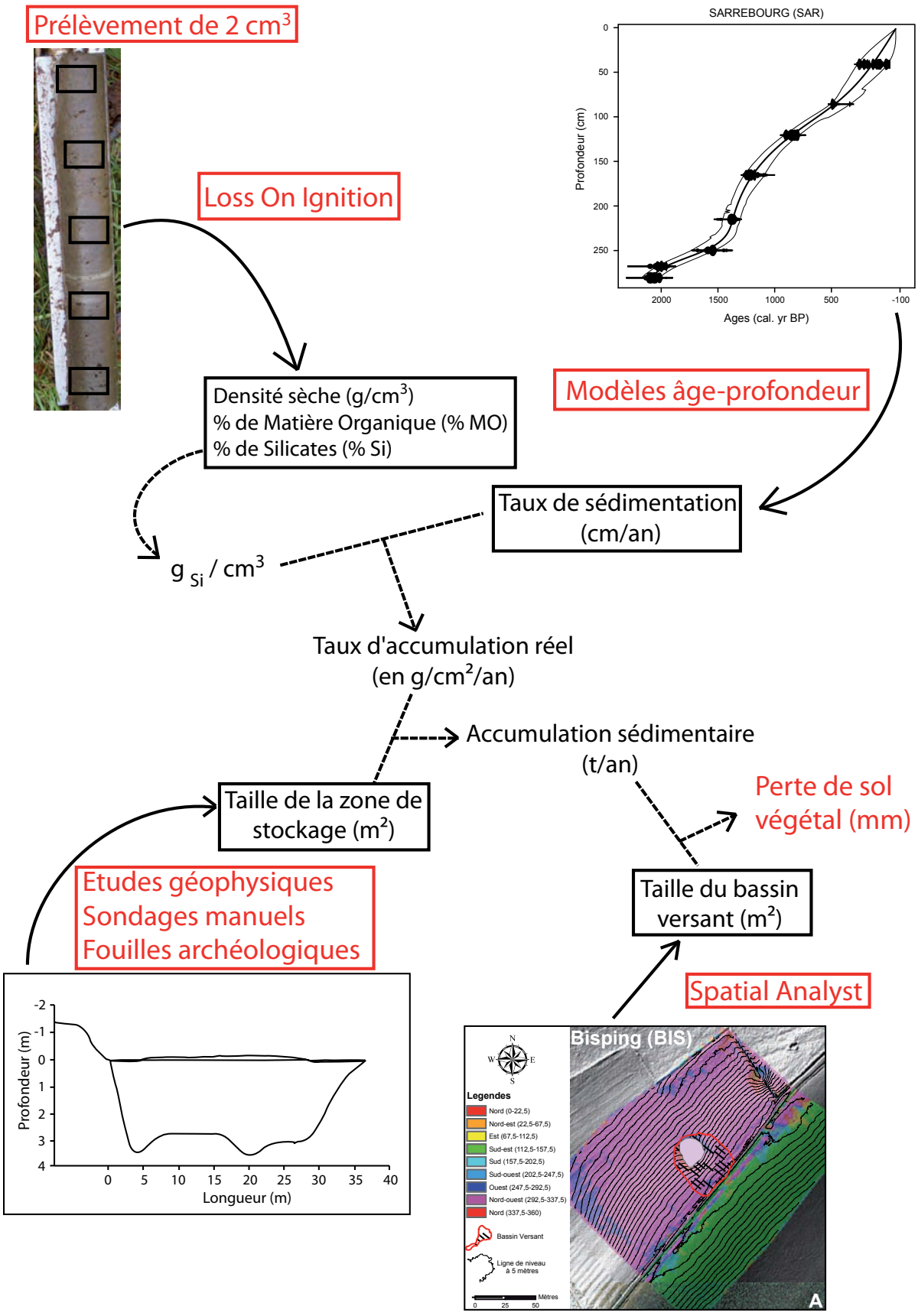


Figure 6.7 - Schéma explicatif des différentes étapes et calculs nécessaires au bilan de perte de sol végétal (en mm) sur le bassin versant des mardelles. Les encadrés rouges correspondent aux méthodes mises en oeuvre afin d'acquérir les données de base qui sont elles, encadrées en noir.

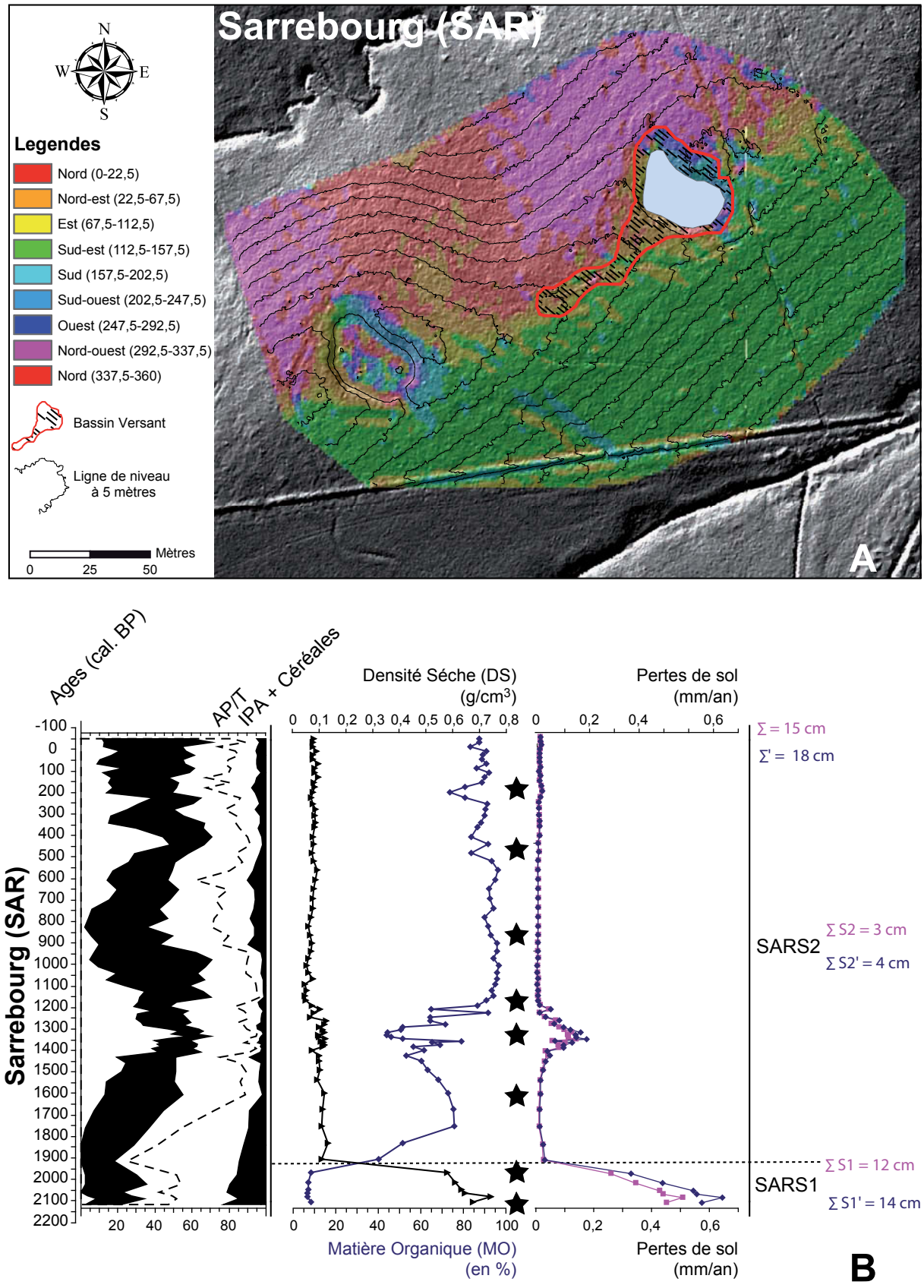


Figure 6.8 - Lignes de niveaux et carte d'orientation des versants (a) nécessaires pour la délimitation du bassin versant de la mardelle de Sarrebourg (SAR). La fourchette haute des pertes de sol sont en rose et la fourchette basse en bleu. Les étoiles représentent l'emplacement des datations radiocarbone.

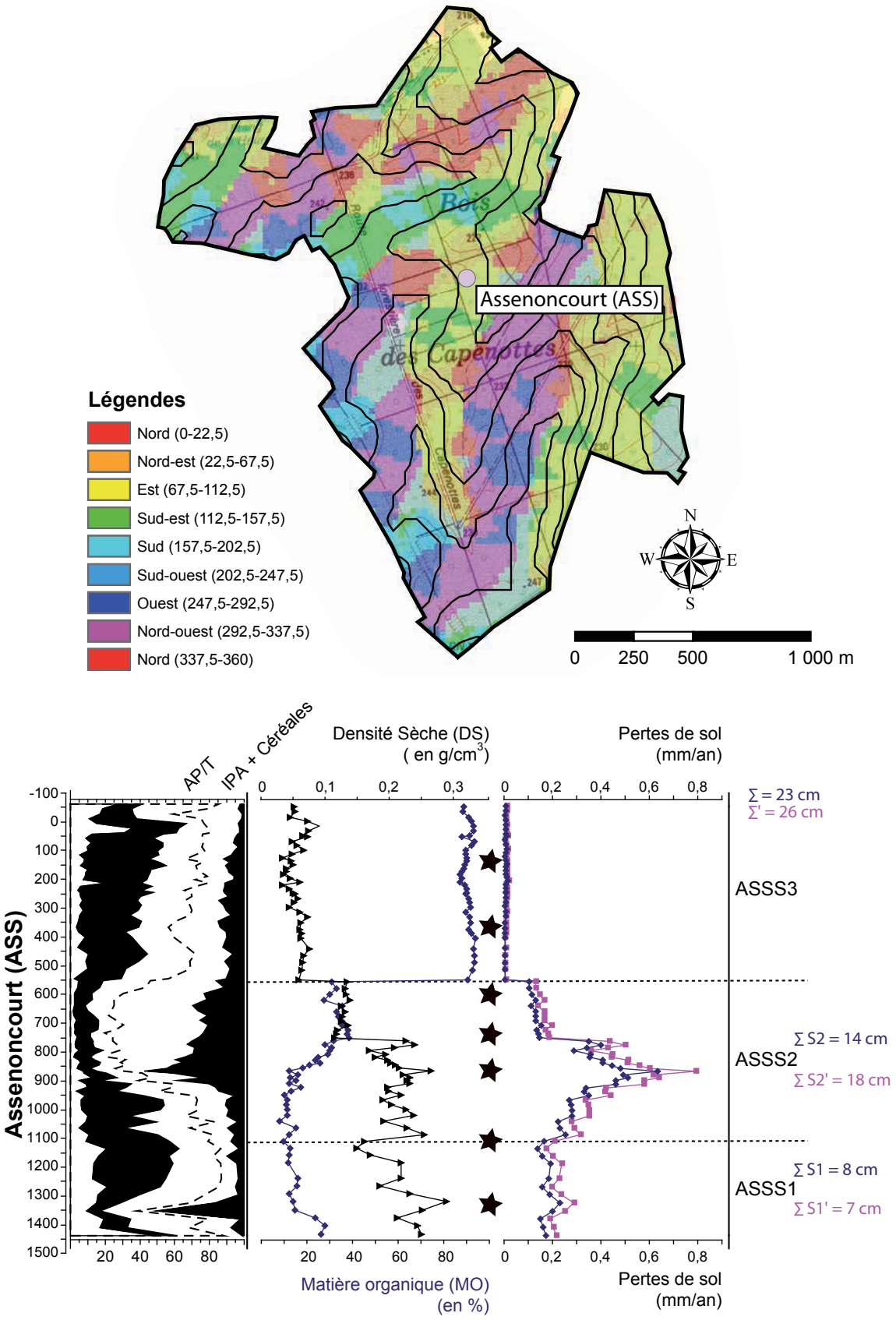


Figure 6.9 - Lignes de niveaux et carte d'orientation des versants (a) nécessaires pour la délimitation du bassin versant de la mardelle de Bisping (BIS). La fourchette haute des pertes de sol sont en rose et la fourchette basse en bleu. Les étoiles représentent l'emplacement des datations radiocarbone.

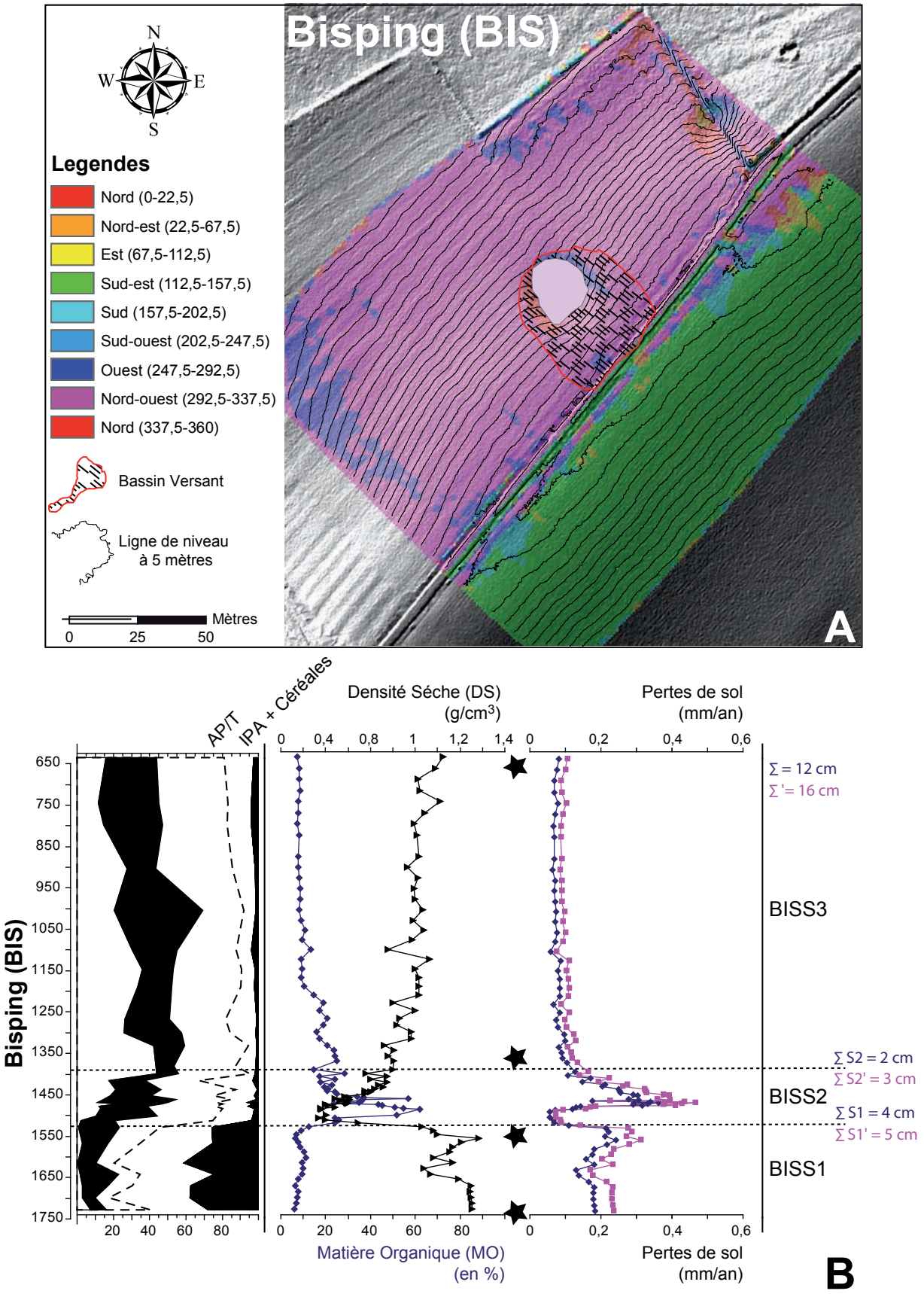


Figure 6.10 - Lignes de niveaux et carte d'orientation des versants (a) nécessaires pour la délimitation du bassin versant de la mardelle de Bisping (BIS). La fourchette haute des pertes de sol sont en rose et la fourchette basse en bleu. Les étoiles représentent l'emplacement des datations radiocarbone.

2.3.2 Mardelle d'Assenoncourt (ASS)

La séquence d'Assenoncourt (ASS) offre une vision de l'effet des pratiques agraires de la période médiévale sur les épaisseurs de sols dans notre zone d'étude. Mais le massif forestier d'Assenoncourt n'étant pas couvert par les images LiDAR LGV ou IGN, la délimitation du bassin versant de la mardelle est basé sur les lignes de niveau à 5 mètres, donc assez peu précis (Fig. 6.9). Son bassin versant recouvre approximativement 600 m², alors que selon les relevés de F. Ritz (Ruffaldi *et al.*, 2007), la mardelle couvre une surface de 400 à 500 m².

Ainsi, les défrichements et les pratiques agraires autour de la mardelle de 1100 cal. BP à 550 cal. BP, entraînent une érosion proche de celle enregistrée à l'âge du Fer à Sarrebourg avec une perte de sol de 14 à 18 cm. Sur l'ensemble de la séquence, le bassin versant aurait subi tout de même une érosion de 22 à 28 cm au cours des 1500 années couvertes par cet enregistrement.

2.3.3 Mardelle de Bisping (BIS)

Les fouilles réalisées en 2009 par l'INRAP (*cf. Chapitre 2*) et les relevés de terrain établis avec S. Goepp (2010) offrent une vision du remplissage et de la surface correspondant à la zone plane du fond de la mardelle, soit environ 350 à 450 m² sur une hauteur de sédiment de 84 cm. Le bassin versant de la mardelle est très difficile à délimiter, sa surface est d'approximativement 1500 m² (Fig. 6.10).

A Bisping, la phase d'anthropisation agro-pastorale (BISS1) n'engendre qu'une faible érosion de 4 à 5 cm de sol avec des valeurs moyennes de perte de sol (mm/an) divisées par 3 par rapport à Sarrebourg. Les scores d'ACP (*cf. Chapitre 5*) suggérant une pratique très pastorale à Bisping à cette époque et peut être plus agricole à Sarrebourg, et pourrait expliquer ces différences d'érosions. Les problèmes de délimitation du bassin versant de la mardelle de Bisping peut également expliquer ce facteur 3 entre nos données.

Dans la période suivante (BISS2), après une baisse de l'érosion associée à la reforestation du bassin versant (sédimenation composée de bois et d'argile), l'érosion augmente rapidement (feuilles et argile) pour atteindre des valeurs plus élevées que celles obtenues lors de la grande phase d'anthropisation (BISS1). Ce résultat illogique s'explique certainement par un manque de datations radiocarbone pour encadrer le changement sédimentaire eutour de 1400 cal. BP. On obtient alors une exagération du taux de sédimentation par le modèle âge profondeur et donc des valeurs abérrantes de pertes de sols en mm/an.

Notre travail dans ce manuscrit s'est focalisé sur des mardelles présentant la spécifité d'être en position topographique sommitale. Cette localisation rend évidemment difficile les tentatives de

délimitation de leurs bassins versants et engendre des biais dans ces reconstitutions de perte de sol. La compaction des sédiments et la datation optimale des phases sédimentaires (Bisping) sont également des paramètres limitant de ces calculs.

2.4 Fouilles archéologiques

Lors des fouilles archéologiques de la ligne LGV Est en 2009, l'équipe de Sébastien Viller (INRAP, Metz) a découvert au niveau d'un point bas topographique sur la commune de Haut-Clocher, la présence de structures archéologiques sous une épaisseur de limons stériles de 160 à 200 cm de profondeur correspondant à un comblement de talweg (Viller, 2009). Ceci alors que les points hauts du bassin versant situés en champs, ne présentent actuellement que de faibles épaisseurs de limons (environ 20 cm).

D'un point de vue archéologique, ces découvertes correspondent à un chemin empierré et à une structure circulaire pouvant être assimilée à un pédiluve, destinée au lavage des pieds des animaux et/ou à leur abreuvage dans des contextes de *villae* gallo-romaines (Viller & Dohr, 2008). Ce vestige archéologique est localisé à 500 m environ de la mardelle de Langatte (LAN) fouillée également en 2009 et dont la création est datée de la fin de l'âge du Fer ou du début de la période Romaine (*cf. Chapitre 3*).

La délimitation du bassin versant (0,27 km²) correspondant à la zone de dépôt prospectée (0,04 km²) pemet le calcul d'un bilan approximatif de l'érosion postérieur à l'utilisation de la structure empierrée (Fig. 6.9). Les différents sondages identifient la présence de ces structures à des profondeurs oscillant entre (1) 165 et (2) 350 cm. Ainsi sur cette petite zone de bassin versant, selon les profondeurs de limons considérées, la perte de sol correspondrait entre (1) 24 cm et (2) 50 cm. Ce calcul est évidemment à prendre avec toutes les précautions dûes au manque de précisions des mesures sur site. Toutefois, il est intéressant de noter la concordance de ces résultats avec ceux obtenus auparavant.

2.5 Granulométrie et phosphore

Lors des fouilles archéologiques des mardelles de Bisping (BIS) et de Langatte (LAN), nous avons prélevé des échantillons des différentes Unités Stratigraphiques (US) afin de caractériser la granulométrie des sédiments. Ces analyses sont effectuées par le laboratoire d'Analyse de Sols (INRA, Arras) auxquelles s'ajoutent des mesures de phosphore assimilable dans les sédiments, quantifiées suivant la méthode du laboratoire de Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers de l'INRA de Nancy.

La stratigraphie à Bisping (BIS) peut être décomposée en trois grandes US avec, en surface,

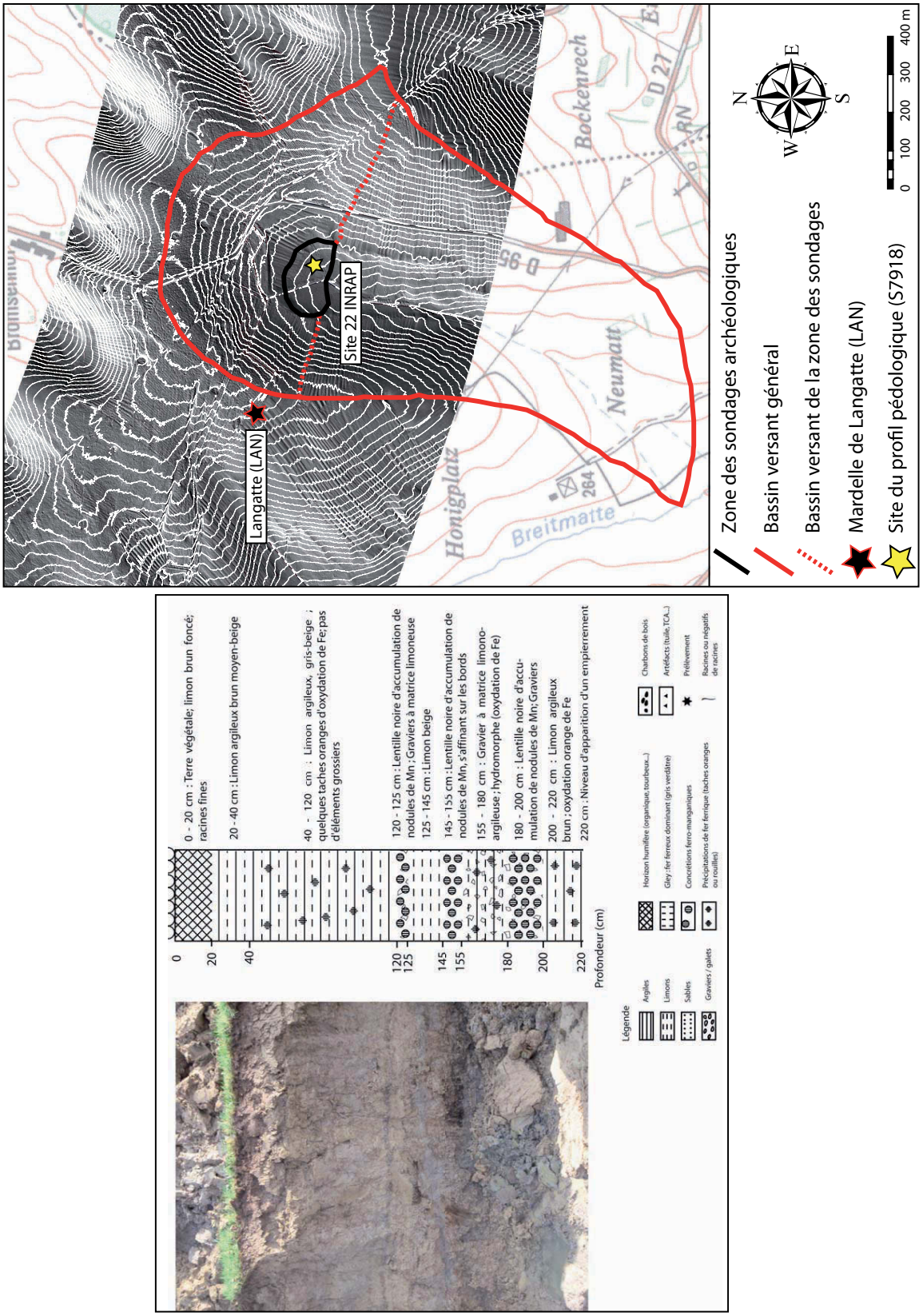


Figure 6.11 - Lignes de niveaux et image LiDAR LGV (ombrage 315°, élévation 10°) de la zone du site 22 « Ersterbach » (Viller, 2009) et de la délimitation de la zone prospecté par l'INRAP en 2009 et ayant mis au jour un empiremment sous plusieurs mètres de limons stériles comme illustré par la coupe, la photographie et le schéma relevé sur site par Stéphanie Goepp.

un horizon Ap recouvrant un matériel ayant potentiellement subi une pédogénèse et présentant les caractéristiques d'un Luvisol ; suivi d'une accumulation sédimentaire regroupant les unités stratigraphiques US1, US2a et US2b caractéristiques de la sédimentation des mardelles (*cf. Chapitre 3*) ; et le socle géologique marneux que l'on retrouve sur les bordures (marne rouge et grises) et le fond (marne rouge) de ces structures (Fig. 6.12).

L'Unité Stratigraphique 1 (US1) est une accumulation sédimentaire datant de la création de la mardelle dans un contexte marqué par les pratiques agro-pastorales (*cf. Chapitre 5*). D'un point de vue granulométrique, il est composé par des fractions fines, principalement d'argiles (600 g/kg) et de limons fins (200 g/kg). En comparaison avec l'horizon AP de surface composé par des limons peu épais (moins de 30 cm), cette unité stratigraphique est légèrement appauvrie en éléments sableux fins et grossiers.

L'unité stratigraphique US2, datée de la fin de la période Gallo-romaine correspond à une déprise agricole rapide et à une reforestation des sols environnants entraînant son implantation sous canopée (*cf. Chapitre 5*). Cette affirmative est étayée par l'accumulation de bois (US2a) et de feuilles (US2b). La granulométrie du sédiment est cette fois quasiment exclusivement composée d'argile (800 g/kg), les autres classes granulométriques étant très faibles.

L'un des éléments les plus intéressants est la concentration en Phosphore dans les marnes rouges et grises (0,3 à 0,4 mg/g de sédiment) qui sont identiques à celles mesurées dans l'horizon de surface (Ap) et dans l'Unité Stratigraphique 1. En surface, la teneur en phosphore peut être expliquée par des amendements chimiques lors de la mise en culture de ces sols au cours des 50 dernières années.

Ce schéma est conforté par les résultats obtenus sur la mardelle de Haut-Clocher (Fig. 6.13) présentant également une richesse des marnes en phosphore puis une proportion quasiment identique de cet élément dans le premier horizon de sédimentation (US1), que l'on ne va plus enregistrer dans les unités sédimentaires suivantes.

La similarité des proportions de phosphore et des classes granulométriques entre les marnes rouges et grises, dont le fantôme de leur absence forme la mardelle, et l'US1 est un argument étayant un possible amendement en phosphore et en carbonate des limons de plateau en surface par la marne extraite, puis une érosion des sols formant cette première unité stratigraphique si caractéristique.

D'ailleurs la proportion de phosphore est divisée par deux dans l'unité stratigraphie suivante (US2a et US2b), le phosphore mesuré provenant alors des nombreuses feuilles contenues dans ce sédiment.

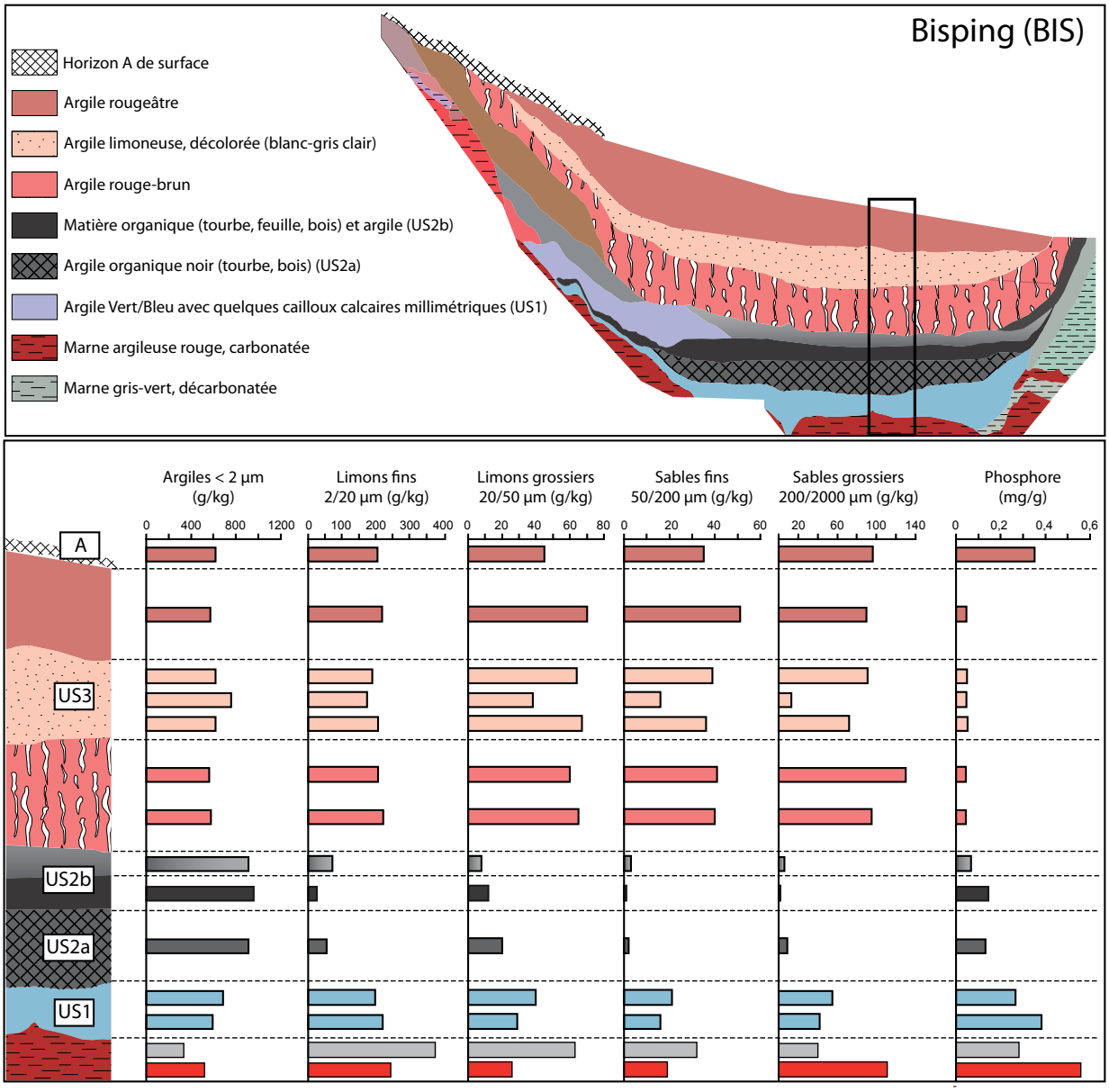


Figure 6.12 - Analyse granulométrique (5 fractions) et du Phosphore assimilable (mg/ kg) des différentes Unités Stratigraphiques (US) de la mardelle de Bisping, dont la description est ici rappelée mais présentée de façon plus exhaustive dans le *Chapitre 3* de ce manuscrit. Les marnes composant le socle géologique et l'Unité Stratigraphique 1 se révelent être riches en Phosphore que dans l'Horizon A de surface, certainement enrichi récemment par des amendements chimiques.

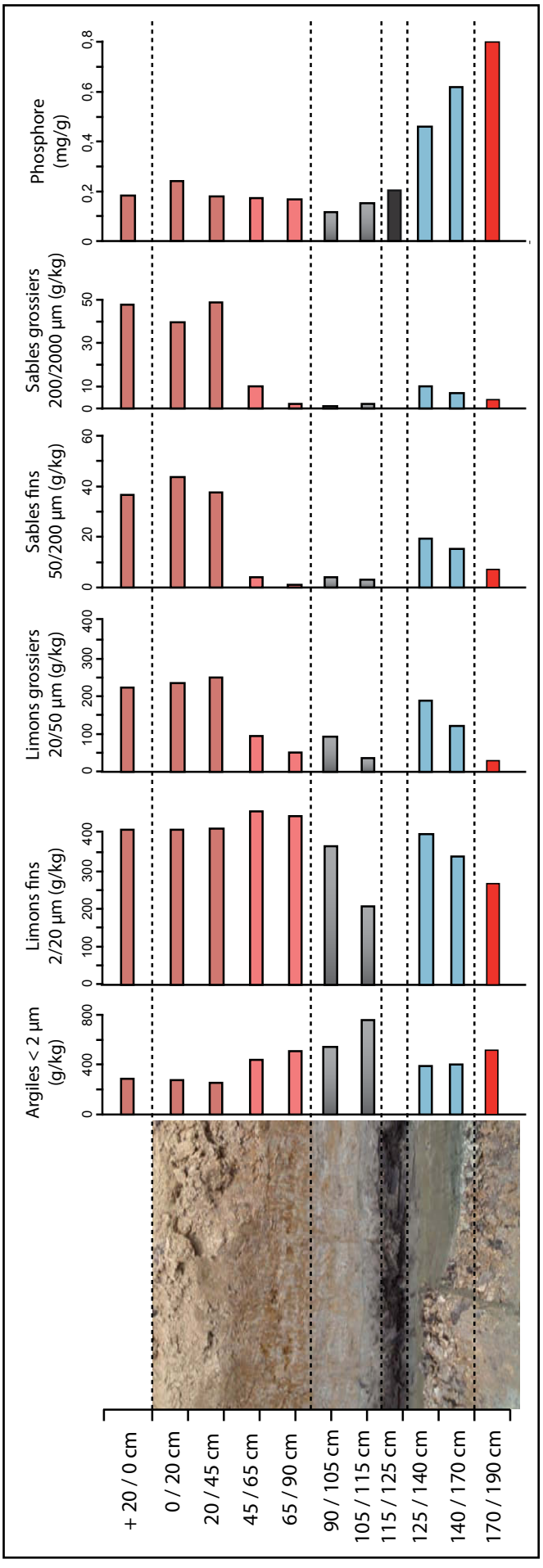


Figure 6.13 - Analyse granulométrique (5 fractions) et du Phosphore assimilable (mg/ kg) des différentes Unités Stratigraphiques (US) de la mardelle de Haut-Clocher, dont la description est ici rappelée mais présentée de façon plus exhaustive en *Annexe 6a-b* de ce manuscrit. Les marnes composant le socle géologique et l'Unité Stratigraphique 1 se révelent être plus riche en Phosphore que dans l'Horizon A de surface, certainement enrichi récemment par des amendements chimiques.

3. Interprétations et discussion

3.1 Dépôts de limons et carte pédologique actuelle

Le dépôt éolien des limons de plateau durant le Pleistocène n'a certainement pas été homogène sur l'ensemble de la région selon l'orientation des versants ou la microtopographie. Selon Goossens (1988), les épaisseurs de limons sont liées à l'orientation des vents et à la topographie de l'époque des dépôts, aboutissant à des limons plus épais sur les versants orientés Nord-est. Dans notre zone d'étude, cette hypothèse ne se confirme que partiellement sur le massif forestier de Mittersheim, mais pas sur les deux autres zones étudiées.

De même, les travaux de Vanwalleghem (*et al.*, 2008) démontrent statistiquement une implantation plus probable des mardelles sur les pentes orientées NE et SE, celles-ci présentant les plus importantes épaisseurs de limons. Il existerait donc une logique d'implantation des mardelles sur les sols les plus acides, légitimant alors l'exploitation de la marne sous-jacente.

Dans notre cas, cette relation entre présence de mardelles et épaisseur de limons n'est pas avérée, toutefois les mardelles sont absentes des sols où la marne est affleurante.

La question est alors de savoir si cette relation n'existe pas ou si elle a pu exister mais à la période de leur création. Les pratiques agro-pastorales antiques et médievales ayant entraînées l'érosion d'une partie des limons de surface modelant la carte pédologique actuelle dont nous nous servons pour la mise en relation de ces deux paramètres.

3.2 Erosions et influences des pratiques anciennes sur la pédologie actuelle

On retrouve des couvertures pédologiques de Limon de Plateau (LP) dans de nombreuses régions en France et en Allemagne. Dans l'Indre, des travaux récents suggèrent une potentialité d'érosion importante des sols (40 à 50 cm) en une vingtaine d'années liée à l'agriculture mécanique (Querrien *et al.*, soumis).

Les travaux de Houben (2008) démontrent grâce à des études pédologiques et des flux sédimentaires sur la bassin versant du Wetterau (Francfort, Allemagne), une érosion des sols des versants d'environ 64 cm dans cette région où l'anthropisation existe depuis 7500 ans (Stobbe, 1996). Enters (2006 ; *et al.*, 2008) a travaillé sur le lac Frickenhauser (Allemagne), localisé à 150 kilomètres au Nord-est de la zone d'étude de Houben. Il démontre par l'étude du remplissage sédimentaire de ce lac, qu'une érosion de 55 cm a eu lieu au cours des 2000 dernières années et que celle-ci est principalement liée aux pratiques agricoles médievales.

Les résultats obtenus à Assenoncourt, Römersberg et Sarrebourg sont caractérisés par une anthropisation sur une fenêtre temporelle plus courte que les travaux Houben. Toutefois, ils retranscrivent une érosion d'un même ordre de grandeur avec par exemple, 30 cm de perte de sols sur les 1500 dernières années à Assenoncourt ceci due aux pratiques agraires médievales.

Ces valeurs sont également comparables aux résultats de Enters *et al.* (2008). L'ensemble de ces travaux restranscrivent des érosions potentielles des limons de surface de plusieurs dizaines de centimètres. La stratigraphie de la séquence de Francaltroff (*cf. Chapitre 5*) confirme cette relation entre l'érosion des limons de surface et les pratiques agro-pastorales durant la Tène, la période Gallo-romaine et médievale.

L'anthropisation a modifié les bilans érosifs par les défrichements et la mise en valeur agricole des sols et particulièrement durant l'antiquité (Bertran, 2004 ; Vanwalleghem *et al.*, 2006a). Toutefois, climat et anthropisation peuvent participer de façon concomittante à l'augmentation de ces flux érosifs (Giguet-Covex *et al.*, in press). Dans le cadre de cette thèse, la corrélation entre une forte anthropisation et des valeurs élevées d'érosion, et inversement, suggère un rôle directe et majoritaire des pratiques agro-pastorales sur l'instabilité des sols.
La carte pédologique actuelle en forêt serait ainsi le fruit des dépôts différentiels au Pleistocène et de remodelage au cours des temps historiques. Ainsi les mardelles, que l'on observe actuellement sur des sols avec de faibles épaisseurs de limons (25-30 cm), auraient été implantées sur des sols aux épaisseurs de limons plus élevés englobant l'épaisseur de l'horizon pédologique Ap cultivé.

Ces bilans érosifs se doivent d'être affinés et poursuivis dans notre zone d'étude afin de mieux quantifier localement les pertes de sols depuis le dévelopement régional de l'anthropisation, par exemple par l'étude du remplissage sédimentaire du bas marais de Francaltroff en utilisant des études géophysiques et de multiples sondages pour définir la stratigraphie du remplissage, et des études sédimentaires sur les sédiments (suceptibilité magnétique, perte au feu, ...).

L'un des points à approfondir afin de consolider ou d'invalider l'hypothèse du marnage des sols est de connaître l'épaisseur de la couverture de limons et la quantité de marne apportée à partir de laquelle un gain de production est attestée sur les fourrages et sur les céréales cultivées à l'époque de la Tène et Gallo-romaine (épautre, orge chevelu).

Chapitre 7

Flore des mardelles intra-forestières : originalité, typologie et évolution



Document de couverture du chapitre

Photographie d'une mardelle de la forêt Domaniale d'Albestroff (Moselle) colonisée par Lysimachia vulgaris. Cliché de David Etienne.

1. Introduction

Les zones humides (marais, forêts humides, prairies humides, tourbières) constituent des mosaïques d'habitats à l'interface entre les milieux aquatiques et les milieux terrestres. Bien qu'elles ne couvrent qu'une faible superficie du territoire métropolitain (5,5%), leur rôle est essentiel. Ces milieux assurent des fonctions de zones de refuge, de reproduction et d'alimentation pour de nombreuses espèces floristiques et faunistiques. Toutefois, les zones humides sont sensibles et menacées par les activités agricoles (drainage), l'urbanisation (pollutions, expansion foncière), l'aménagement du territoire (aéroports, chemins de fer) ainsi que par leur exploitation. En France, 67% de leur surface a disparu au cours du 20ème siècle (1900-1993) (CEE, 1995). La Convention internationale de Ramsar en 1971 entraîna le développement de réseaux de sites naturels tels que les ZNIEFF (Zones Naturelles d'Intérêt Ecologique Faunistique et Floristique) ou les zones *Natura 2000* qui ont permis en partie de freiner cette érosion.

Les politiques de gestion et de restauration de ces milieux humides par les organisations gouvernementales nécessitent, en premier lieu, la compréhension de leur fonctionnement naturel. Toutefois, ces milieux sont également intégrés dans des espaces ayant eux-même potentiellement subi de profonds boulversements au cours des temps histotiques. Ainsi, l'anthropisation des paysages est un paramètre non négligeable puisqu'elle a pu engendrer une perturbation de leurs dynamiques naturelles de comblement et de colonisation végétale (Willis *et al.*, 2006 ; Harris *et al.*, 2006 ; Jackson & Hobbs, 2009).

Les mardelles, en tant que milieu humide, ont fait l'objet de plusieurs études floristiques en France (Couderc, 1979 ; Schneider dans Barth *et al.*, 2001) mais principalement en Belgique et au Luxembourg (Thoen, 1997 ; Thoen & Hérault, 2006 ; Hérault & Thoen, 2008 ; Hérault & Thoen, 2009). En Lorraine, Lequy (2009) a crée une base de données rassemblant des inventaires, provenant de rapports de fin d'études (Ramm, 1999), de travaux d'agents de terrain (Etienne, 1999 ; Duval, 2000 ; Millarakis, 2000 ; Leclerc, 2005) et de scientifiques C. Schneider (dans Barth *et al.*, 2001) (Annexe 18), et propose une typologie et un schéma évolutif. Ce mémoire rassemble 663 relevés floristiques de mardelles pour la plupart situées dans la zone *Natura 2000* du Plateau lorrain (*étang de Lindre, forêt du Römersberg et zones voisines*).

Dans ce chapitre, les relevés floristiques des mardelles sont confrontés à des inventaires forestiers, prairiaux et lacustres afin d'identifier la biodiversité écosystémique et spécifique de ces mares intra-forestières. Puis de déterminer une typologie en se basant sur les différents groupes phytosociologiques qu'elles abritent. Cette typologie est confrontée avec les paramètres physiques de ces structures et avec les analyses polliniques et sédimentaires afin de proposer une vision diachronique de leur colonisation végétale en fonction des grand facteurs du milieu et en particulier des perturbations.

2. Résultats et Interprétations

2.1 La flore des mares forestières comparée aux prairies, forêts et étangs

Les 663 relevés de mares intra-forestières issus de l'analyse bibliographique de Lequy (2009) sont confrontés à 1978 relevés forestiers dans la petite région forestière «Plateau lorrain» de l'IFN (Inventaire Forestier National), 1050 relevés de prairies échantillonnés dans l'ensemble de la Lorraine par Plantureux et Amiaud (UMR Agronomie et Environnement, ENSAIA-Nancy, communication personnelle) et 73 relevés d'étangs principalement réalisés sur le Plateau lorrain (Cluzeau, 1996). Les bryophytes sont exclues car leur relevé n'est pas systématique ou mal assuré dans certains milieux et leur détermination trop dépendante de l'opérateur. La préférence significative des espèces est testée à un seuil de probabilité de 0,01 ($P < 0,01$) par un test de comparaison de fréquence (Fisher) entre leurs fréquences observées dans les différents types de milieux (mardelles, forêts, prairies et milieux humides).

Cette comparaison statistique des fréquences permet d'identifier 78 espèces dont 7 ligneux, 5 fougères et 66 herbacées qui sont statistiquement plus fréquentes dans les mares intra-forestières plutôt que sur les sols forestiers environnants (Tab. 7.1). La grande majorité de ces espèces sont communes pour la région nord-est de la France. Toutefois quelques espèces rares ou peu fréquentes existent dans ces mardelles (*Salix aurita*, *Carex elongata*, *C. rostrata*, *C. nigra*, *Epilobium ciliatum*, *Menyanthes trifoliata* et *Chrysosplenium oppositifolium*) (Lambinon et al., 2004) et représentent une réelle richesse floristique.

La comparaison botanique des quatre écosystèmes (mares, forêts, prairies et étangs) isole cette fois 57 espèces qui sont statistiquement plus fréquentes dans les mares intra-forestières plutôt que dans au moins un des trois autres écosystèmes (forêt, prairie ou téangs) à un seuil de probabilité de 0,01 ($P < 0,01$) (Tab. 7.2). Cette comparaison démontre que la végétation des mardelles intra-forestières est statistiquement moins différente de celle des queues d'étangs, mais est aussi éloignée des contextes forestiers que prairiaux. Les espèces- différenciant réellement le milieu « mardelle » des nombreux lacs et étangs environnants ($P < 0,001$ pour les trois milieux) -ne correspondent en fait qu'à huit espèces dont deux ligneux (*Alnus glutinosa*, *Tilia* sp.), des herbacées méso-hygrophiles (*Carex elongata*, *Glyceria fluitans*, *Carex remota* et *Circaea lutetiana*) et des fougères (*Dryopteris carthusiana* et *Athyrium filix-femina*). Ces mares intra-forestières sont donc caractérisées par des espèces d'aulnaies marécageuses que l'on ne retrouvera pas ou peu dans les écosystèmes forestiers, prairiaux ou lacustres.

2.2 Typologie actuelle des mares intra-forestières

Thoen & Hérault (2006) proposent une typologie basée sur des mesures physico-chimiques

Espèce	Fréquence mares (%)	Fréquence forêts (%)	Seuil du test de Fisher
sp.	59,3	0,2	***
	54,5	0	***
	33,5	0,2	***
	27,9	0	***
	25,6	0,1	***
	23,7	0	***
	22,5	0,2	***
	41	7,3	***
	15,2	0	***
	14,1	0	***
	11,3	0	***
	12,1	0,3	***
	10,3	0	***
	9,6	0	***
	8,7	0	***
	33,7	11,9	***
	7,7	0	***
	6	0	***
	4,3	0	***
	16,5	5,4	***
	3,7	0	***
	3,5	0	***
	3,4	0	***
	3,1	0	***
	2,8	0,1	***
	2,8	0,1	***
	2,5	0	***
	2,5	0	***
	2,8	0,1	***
sp.	2,1	0	***
	6,1	1,5	***
	1,7	0	***
groupe	2,9	0,4	***
	1,5	0	***
	1,5	0	***
	1,5	0	***
	2,6	0,3	***
	6,3	2,2	***
	1,4	0	***
	1,2	0	***
	1,2	0	***
	1,2	0	***
	0,9	0	***
	0,9	0	***
	0,9	0	***
	0,9	0	***
	7,5	4	***
	0,8	0	***
	0,8	0	***
	0,6	0	**
	0,6	0	**
	0,6	0	**
	0,6	0	**
	0,6	0	**
	0,6	0	**
sp.	0,8	0,1	**
	2	0,7	**
	3,2	1,5	**
	26	3,8	***
	4,9	0,1	***
	25,9	13,2	***
	8,9	4,1	***
	1,2	0	***
	15,5	0	***
	10	0	***
	26	8,2	***
	20,1	9,5	***
	3,4	0,2	***
	4,9	2,5	**
sp.	0,6	0	**

Tableau 7.1 - Fréquence de présence des espèces floristiques dans l'inventaire des mares intra-forestières comparées avec 1978 relevés forestiers de la petite région forestière « Plateau lorrain » de l'Inventaire Forestier National (IFN).

Espèce	Fréquence mares (%)	Fréquence forêts (%) (1)	Fréquence prairies (%) (2)	Fréquence étangs (%) (3)	Seuil du test de Fisher (1)	Seuil du test de Fisher (2)	Seuil du test de Fisher (3)
Carex elongata	**59,3**	**0,2**	**0**	**0**	***	***	***
Glyceria fluitans	**54,5**	**0**	**1,6**	**11**	***	***	***
Carex remota	**41**	**7,2**	**0,2**	**5,5**	***	***	***
Grands carex hygrophiles	37,1	2,3	4,2	42,5	***	***	
Juncus sp.	33,7	11,9	23,6	39,7	***	***	
Solanum dulcamara	33,5	0,2	0,1	23,3	***	***	
Juncus effusus	33,4	0	3,6	24,7	***	***	
Lemna minor	27,9	0	0	19,2	***	***	
Alnus glutinosa	**26**	**8,2**	**0,1**	**6,8**	***	***	***
Dryopteris carthusiana	**26**	**3,8**	**0**	**1,4**	***	***	***
Athyrium filix-femina	**25,9**	**13,2**	**0**	**1,4**	***	***	***
Galium palustre	23,7	0	6,1	26	***	***	
***Tilia* sp,**	**20,1**	**9,5**	**0**	**0**	***	***	***
Circaea lutetiana	**16,5**	**5,4**	**0,3**	**0**	***	***	***
Salix cinerea	15,5	0	0	16,4	***	***	
Scutellaria galericulata	15,2	0	0,6	16,4	***	***	
Carex vesicaria	11,3	0	1,8	17,8	***	***	*
Scirpus sylvaticus	10,3	0	4,7	6,8	***	***	
Viburnum opulus	10,3	8,3	0	2,7		***	*
Salix aurita	10	0	0	0	***	***	**
Carex pseudocyperus	9,6	0	0	6,8	***	***	
Dryopteris dilatata	8,9	4,1	0	1,4	***	***	*
Carex rostrata	8,7	0	0	0	***	***	**
Glechoma hederacea	8	3,9	4,6	4,1	***	**	
Carex curta-divulsa	7,7	0	0,1	0	***	***	**
Rumex sanguineus	6,3	2,2	0	0	***	***	*
Agrostis canina	6	0	2,5	1,4	***	***	
Frangula alnus	4,9	2,5	0	0	**	***	
Polystichum aculeatum	4,9	0,1	0	0	***	***	
Scrophularia nodosa	4,6	3,9	0	4,1		***	
Carex elata	4,3	0	0,1	1,4	***	***	
Geum urbanum	4,1	4,1	0,1	2,7		***	
Betula pubescent	3,4	0,2	0	2,7	***	***	
Tilia platyphyllos	3,2	2,8	0	0		***	
Epilobium montanum	2,9	1,5	0	4,1	*	***	
Valeriana repens	2,9	0,4	0,6	4,1	***	***	
Ranunculus auricomus	1,7	2,8	0,1	0		***	
Callitriche palustris	1,5	0	0,1	0	***	***	
Epilobium tetragonum	1,4	0	0	1,4	***	***	
Cornus mas	1,4	2,5	0	0		***	
Epilobium ciliatum	1,2	0	0	0	***	***	
Thelypteris palustris	1,2	0	0	1,4	***	***	
Carex cuprina	1,1	0	0	2,7	***	**	
Potentilla palustris	0,9	0	0,1	0	***	*	
Callitriche stagnalis	0,9	0	0	2,7	***	**	
Epilobium parviflorum	0,9	0	0	4,1	***	**	
Carex strigosa	0,8	0,6	0	0		**	
Carex nigra	0,6	0	0	0	**	*	
Carex paniculata	0,6	0	0	1,4	**	*	
Menyanthes trifoliata	0,6	0	0	0	**	*	
Epilobium palustre	0,6	0	0,7	1,4	**		

Tableau 7.2 - Fréquences de présence des espèces floristiques dans l'inventaire des mares intra-forestières, comparées aux relevés de l'Inventaire Forestier National (1) dans la zone du Plateau lorrain, et à des relevés de milieux prairiaux (2) et aquatiques (3) dans la même zone d'étude. Ces espèces sont celles statistiquement plus fréquentes sur les mares intra-forestières plutôt que sur tous les autres milieux, cette différence étant testée par un test de Fischer.

(conductivité) et des classifications statistiques de leurs relevés floristiques. Cette typologie est principalement basée sur les plantes herbacées car « *les espèces ligneuses ont une longévité telle qu'elles se sont parfois établies [...] quant les conditions stationnelles pouvaient être différentes que celles observées actuellement* ».

L'utilisation d'analyses multivariées (ACP, AFC) sur les inventaires floristiques rassemblés par Lequy (2009) en Lorraine ne permet pas d'établir clairement une typologie. Les méthodologies utilisées par les différents opérateurs ne sont pas assez homogènes et trop d'espèces forestières sont signalées, les bordures de la mare étant quelque fois intégrées dans ces relevés. En se basant sur la nomenclature et la composition des groupements phytosociologiques, nous pouvons discriminer des pôles extrêmes dans la typologie actuelle correspondant tous à des végétations préforestières et forestières (Catteau *et al.*, 2009).

Pour ce travail, seuls les relevés de Fénétrange (Ramm, 1999) et des massifs forestiers du Römersberg, de Saint Jean et d'Assenoncourt (Ritz, non publié) sont utilisés. Ces 247 relevés floristiques sont conservés ils sont plus homogènes, écartant les milieux forestiers alentour du relevé. Ils ne renseignent pas la seule présence/absence des espèces mais également leur recouvrement et leur abondance selon le système définit par Braun-Blanquet (1964). Pour chaque type de colonisation végétale identifiée (T1 à T6), les espèces les plus fréquentes et leur recouvrement moyen sont listés.

2.2.1 Mardelles sans végétation ou à faible végétation (T1)

Il existe des structures ne présentant aucune végétation herbacée et arbustive (Fig. 7.1a). Mais malheureusement les études floristiques n'ont généralement pas pris en compte ces dépressions du fait d'un manque évident d'intérêt botanique.

	Recouvrement moyen	Fréquences
Carex remota	1	60
Glyceria fluitans	1	41
Carex elongata	1	33
Athrium filix-femina	+	24
Lemna minor	3	22
Deschampsia cespitosa	1	20
Crataegus monogyna	p	20
Circea lutetiana	+	20

Tableau 7.3 - Fréquences et recouvrement moyen (de + à 5) des principales espèces représentées dans la classification T1 des mardelles.

D'autres mares ne présentent quant à elles qu'un faible recouvrement végétal (+ ou 1) de quelques espèces herbacées (Tab. 7.3) méso-hygrophiles (*Carex remota*, *Glyceria fluitans* et *Carex elongata*) en bordure, associées quelques fois à des tapis de *Lemna minor* (Fig. 7.1b). Cette association de végétation ne peut être rattachée à un groupement phyto-sociologique existant.



Figure 7.1(a-d) - Photographies de mardelles (T1) sans aucune végétation (a) où colonisées seulement par quelques herbacées hygrophiles (*Juncus effusus*) et par *Lemna minor* (b). Les deux autres clichés correspondent à des structures couvertes principalement par des herbacées (T2) (c) ou par une saulaie (d). Clichés de V. Etienne et de Frédéric Ritz.

2.2.2 Mares à végétation unique herbacée (T2)

La présence d'une composante ligneuse n'est pas systématique, ainsi de nombreuses mares intra-forestières (24%) ne présentent ni aulne, ni saule, ni bouleau mais une végétation structurée en touffes d'herbacées avec un recouvrement (de 3 ou 4) quasi monospécifique de plusieurs espèces de cypéracées (*Carex elongata*, *Carex remota* ou *Carex rostrata*) (Fig. 7.1c). Ces cypéracées peuvent également être associées à des plantes méso-hygrophiles (*Deschampsia cespitosa*, *Glyceria fluitans*, *Juncus effusus*, *Iris pseudocarus* et *Solanum dulcamara*) ou à des fougères (*Athyrium filix-femina*). Ce type de végétation peut être liée au groupement *Athyrio filicis-feminae-Caricetum pendulae* (Julve, 1993, 1997) dans une variante où *Carex pendula* serait remplacé par *Carex elongata* (*Carici elongatae*).

	Recouvrement moyen	Fréquences
Carex elongata	2	79
Carex remota	3	59
Glyceria fluitans	2	59
Solanum dulcamara	2	43
Athrium filix-femina	+	38
Deschampsia cespitosa	1	36
Juncus effusus	1	32
Crataegus monogyna	p	30
Iris pseudacorus	2	30
Lemna minor	1	25
Scuttelaria galericulata	1	21
Circea lutetiana	1	21
Carex rostrata	2	20

Tableau 7.4 - Fréquences et recouvrement moyen (de + à 5) des principales espèces représentées dans la classification T2 de type *Athyrio filicis-feminae - Caricetum elongatae.*

2.2.3 Mares à saule (T3)

Il s'agit aussi bien de peuplements de *Salix aurita* que de *Salix caprea* que l'on retrouve en proportion équivalente sur 8% des structures étudiées (Fig. 7.1d). *Salix* est associé de façon quasiment systématique à *Carex elongata* mais également à d'autres herbacées méso-hygrophiles tels que *Carex remota*, *Juncus effusus*, *Solanum dulcamara*, *Glyceria fluitans*, des fougères (*Athyrium filix-femina)* et des plantes vivaces (*Lysimachia vulgaris*). Salix peut être associé sur certaines mares à *Rubus* sp. Ce type de colonisation végétale peut être associé à un *Rubo caesii-Salicetum auritae* (Passarge, 1985).

Il est à noter l'existence dans notre échantillonnage, d'une structure

	Recouvrement moyen	Fréquences
Carex elongata	3	86
Salix caprea	2	57
Juncus effusus	1	57
Salix aurita	2	52
Solanum dulcamara	1	52
Carex remota	2	48
Glyceria fluitans	1	38
Athrium filix-femina	+	29
Carex rostrata	2	24
Lysimachia vulgaris	1	24
Galium palustre	1	24
Iris pseudacorus	1	24
Rubus sp.	+	24

Tableau 7.5 - Fréquences et recouvrement moyen (de + à 5) des principales espèces représentées dans la classification T3 du type *Rubo caesii - Salicetum cinerea.*



Figure 7.2(a-d) - Photographies de mardelles (T4) correspondant à la variante de l'*Alnion glutinoase* sans *Carex remota* ou *C. elongata* (a), au groupement *Carici elongatae-Alnetum glutinosae* (b), ou la variante type *Cirsio oleracei-Alnetum glutinosae* (c). La dernière photographie correspond à la mardelle d'Assenoncourt (ASS) et illustre le cas d'une tourbière acide à sphaignes (d). Clichés de David Etienne et de Frédéric Ritz.

présentant une saulaie (*Salix aurita*) associée à un peuplement quasi mono-spécifique de *Carex elata* où est également identifié la présence de sphaignes (*Sphagnum* sp.).

2.2.4 Aulnaies marécageuses (T4) / à sphaignes (T5)

Pour ces aulnaies marécageuses (T4) correspondant au type de colonisation végétale le plus fréquent (45%), *Alnus glutinosa* est l'espèce ligneuse principale.

	Recouvrement moyen	Fréquences
Alnus glutinosa	2	100
Carex elongata	2	90
Glyceria fluitans	2	46
Carex remota	2	48
Dryopteris carthusiana	+	46
Solanum dulcamara	1	32
Carex rostrata	2	30
Lemna minor	2	29
Athrium filix-femina	+	28
Juncus effusus	1	27
Dryopteris dilatata	+	25
Crataegus monogyna	p	21
Circea lutetiana	+	20

Tableau 7.6 - Fréquences et recouvrement moyen (de + à 5) des principales espèces représentées dans la classification T4 du type *Carici elongatae-Alnetum glutinosae.*

De façon très majoritaire (65%), ces aulnaies marécageuses sont colonisées par des aulnaies à glycérie flottante (*Glycerio fluitantis-Alnetum glutinosae)* (Noirfalise & Sougnez, 1961). En Belgique, cette association phytosociologique est décrite sous le nom d'aulnaies à Laiche allongée (*Carici elongatae-Alnetum glutinosae*) (Koch, 1926). Ces deux groupements sont caractérisés par plusieurs herbacées telles que *Carex elongata*, *Athyrium filix-femina*, *Dryopteris cartusiana* et *Dryopteris dilatata* mais également *C. remota*, *C. rostrata*, *Glyceria fluitans* et *Solanum dulcamara* (Fig. 7.2a).

Au sein de notre échantillonage, on peut identifier deux variantes de cette alliance de l'*Alnion glutinosae*. La première variante est caractérisée par la présence d'aulne dans la strate arboréenne mais un très faible recouvrement en plantes herbacées. On ne retrouve quasiment pas de *Carex elongata* ni de *Carex remota*.

	Recouvrement moyen	Fréquences
Alnus glutinosa	2	100
Glyceria fluitans	1	52
Dryopteris carthusiana	+	44
Carex elongata	+	40
Carex remota	+	40
Dryopteris dilatata	+	36
Juncus effusus	1	20

Tableau 7.7 - Fréquences et recouvrement moyen (de + à 5) des espèces présentes dans la première variante de l'*Alnion glutinosaea.*

Ces structures présentent une lame d'eau de plusieurs dizaines de centimètres et une sédimentation très minérale (Fig. 7.2b).

L'autre variante de l'*Alnion glutinosae* que l'on rencontre est toujours caractérisée par *Alnus*

	Recouvrement moyen	Fréquences
Alnus glutinosa	2	100
Iris pseudocarus	2	100
Carex elongata	2	90
Glyceria fluitans	2	70
Solanum dulcamara	2	60
Salix aurita	1	45
Rubus sp.	1	45
Juncus effusus	2	30
Carex rostrata	2	30
Typha angustifolia	2	30
Dryopteris dilatata	1	30
Galium palustre	1	30
Carex pseudocyperus	1	30
Dryopteris carthusiana	1	30
Lemna minor	2	29
Carex remota	2	22
Athrium filix-femina	1	22
Deschampsia cespitosa	1	22
Eupatorium cannabinum	1	22
Filipendula ulmaria	+	22
Scirpus sylvaticus	2	20
Viburnum opulus	1	20

Tableau 7.8 - Fréquences et recouvrement moyen (de + à 5) des espèces présentes dans la seconde variante de l'*Alnion glutinosaea.*

	Recouvrement moyen	Fréquences
Sphagnum sp.	3	100
Carex elongata	2	100
Betula pubescent	3	80
Iris pseudacorus	1	60
Dryopteris carthusiana	+	60
Glyceria fluitans	1	60
Carex riparia	2	43
Molinia sp.	1	40
Juncus effusus	1	40
Dryopteris dilatata	+	40
Menyanthes trifoliata	1	39
Salix cinerea	1	38
Carex remota	1	30
Carex rostrata	3	30
Scirpus sylvaticus	1	20
Alnus glutinosa	1	20

Tableau 7.9 - Fréquences et recouvrement moyen (de + à 5) des principales espèces représentées dans la classification T5 de type *Sphagnum-Alnetum glutinosae*

glutinosa et son association végétale est très proche du *Carici elongatae-Alnetum glutinosae* décrite ci-dessus. Toutefois, la structure est pratiquemment entièrement végétalisée et sa composante herbacée est enrichie par des hygrophiles (*Iris pseudocarus*, *Thypha angustifolia)* et des herbacées méso-hygrophiles (*Filipendula ulmaria*, *Scirpus sylvaticus*). La strate arbustive est également enrichie par *Viburnum opulus*, *Rubus* sp. et *Salix aurita.* Ce type de groupement végétal pourrait être rattaché aux aulnaies à Cirse des maraîchers (*Cirsio oleracei-Alnetum glutinosae*) définit par Noirfalise & Sougnez (1961) (Fig. 7.2c).

On retrouve également sur certaines aulnaies (T5), la présence de sphaignes en association avec *Alnus glutinosa* (*Sphagno-Alnetum glutinosae*) (Lemée, 1937) (Fig. 7.2c). La végétation herbacée est dominée par *Carex elongata* mais regroupe également les espèces caractéristiques des deux autres types d'aulnaies marécageuses décrits ci-dessus, enrichi évidemment de la présence de plusieurs espèces de sphaines.

2.2.5 Boulaie acide à sphaignes (T6)

Les boulaies à sphaignes (*Sphagno*

palustris-Betuletum pubscentis) (Mériaux *et al.*, 1980) ne représentent qu'une très faible proportion de notre échantillonage (1 à 2%) (Fig. 7.2d). Sur ces petites tourbières, la présence d'un radeau flottant de sphaignes au centre de la structure influence les conditions d'acidité. Des mesures de pH réalisées sur la mare tourbeuse du Römersberg démontrent un gradient de pH suivant la distance à la berge. L'alimentation hydrique des berges provient des eaux ayant ruisselées sur les sols argilo-marneux environnant, ainsi le pH y est neutre. Pour le radeau flottant, les valeurs de pH sont très acides (4,3) ceci est du à un apport hydrique exclusivement pluviale et à la capacité des sphaignes à emettre des protons (H^+) afin de maintenir des conditions acides (Manneville *et al.*, 1999).

	Recouvrement moyen	Fréquences
Sphagnum sp.	3	100
Carex elongata	2	100
Betula pubescent	3	80
Iris pseudacorus	1	60
Dryopteris carthusiana	+	60
Glyceria fluitans	1	60
Carex riparia	2	43
Molinia sp.	1	40
Juncus effusus	1	40
Dryopteris dilatata	+	40
Menyanthes trifoliata	1	39
Salix cinerea	1	38
Carex remota	1	30
Carex rostrata	3	30
Scirpus sylvaticus	1	20
Alnus glutinosa	1	20

Tableau 7.10 - Fréquences et recouvrement moyen (de + à 5) des principales espèces représentées dans la classification T5 de type *Sphagno palustris-Betuletum pubscentis.*

Ces valeurs de pH conditionnent la disposition de la végétation sur ces mares tourbeuses intra-forestières comme on peut l'observer sur les mardelles d'Assenoncourt (Ruffaldi *et al.*, 2007) et du Römersberg (RÖM). Au Römersberg, on observe un anneau d'eau libre qui borde la mardelle et représente l'interface entre le milieu humide et le sol forestier. Les conditions d'acidité sont très faibles à neutres. On retrouve principalment des plantes herbacées méso-hygrophiles telles que *Carex rostrata*, *Carex elongata* et *Glyceria fluitans*. Le radeau flottant au centre de la structure présente des conditions acides où l'on retroive généralement des sphaignes (*Sphagnum palustre*, *S. squarrosum* et *S. flexuosum*) et une boulaie (*Betula pubescent*). La zone de l'exutoire est colonisée par des herbacées telles que *Iris pseudocarus* et *Menyanthes trifoliata*.

Les mares intra-forestières présentent donc des colonisations végétales actuellement différentes. Pourtant, les cartes anciennes (Cartes des Naudins et Carte de l'Etat Major) démontrent que ces mares sont dans un même contexte forestier depuis plusieurs centaines d'années. Nous recherchons donc les paramètres pouvant ou ayant pu influencer la typologie actuelle que l'on observe aujourd'hui.

2.3 Relation entre la superficie et la typologie des mares intra-forestières

Les superficies de 245 mares mesurées sur le terrain et en utilisant les données LiDAR LGV (cf. *Chapitre 4*) sont confrontées à la typologie de végétation des mardelles intra-forestières décrite ci-dessus. Ces données démontrent une relation entre le type de colonisation végétale actuel (T1 à T6) et leur superficie (en m²) (Fig. 7.4).

Ainsi les mares sans végétation (T1) sont les plus petites (moyenne m², médiane m²), alors que celles abritant une colonisation végétale de type uniquement herbacée (T2) (moyenne m², médiane m²), les saulaies (T3) (moyenne m², médiane m²) ou les aulnaies (T4) (moyenne m², médiane m²) couvrent des superficie plus grandes mais quasiment identiques.

Les mares colonisées par des sphaignes, que ce soit les aulnaies (T5) (moyenne m², médiane m²) ou les boulaies (T6) (moyenne m², médiane m²) et même la seule saulaie à sphaignes identifiée dans notre échantillonnage (m²), possèdent des superficies correspondant au double des autres mares.

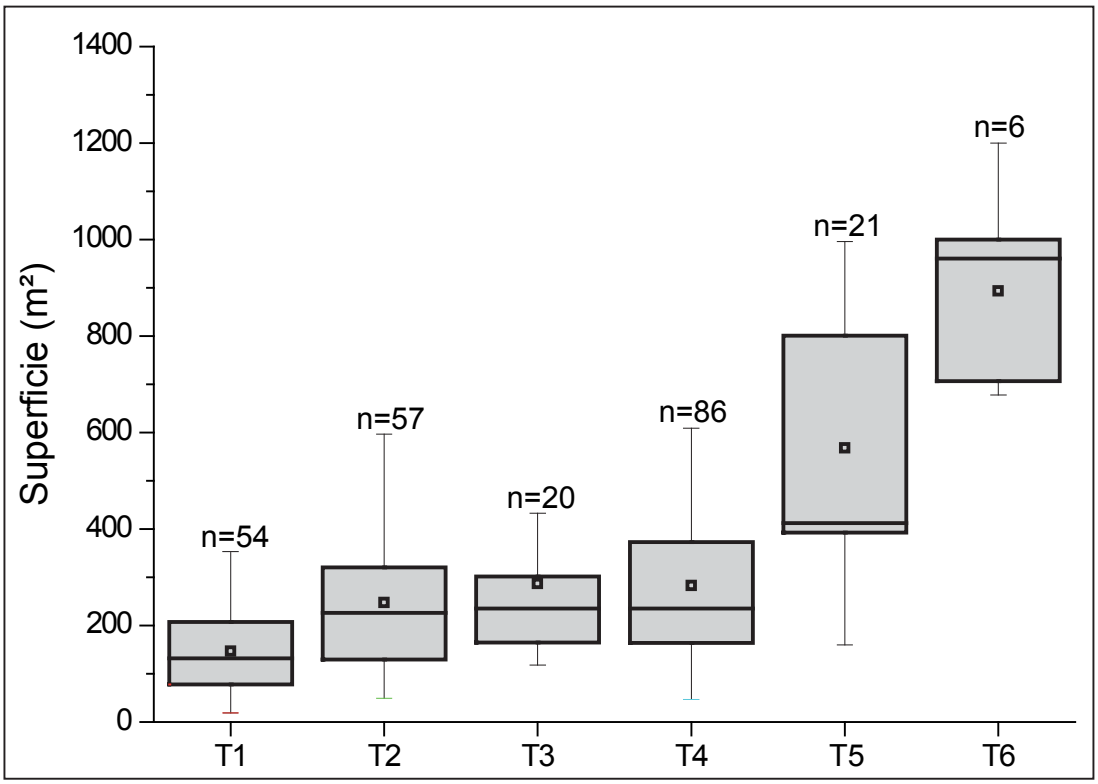


Figure 7.3 - Boîtes à moustaches des superficies couvertes par les mardelles intra-forestières classées selon la typologie (T1 à T6) décrite précédemment dans ce chapitre.

Cette relation entre la taille de la structure et sa colonisation végétale pourrait être liée à plusieurs paramètres. Tout d'abord, la surface couverte par la mare influence indirectement la taille du trou dans la canopée (luminosité). Et également la dynamique de sédimentation avec un comblement plus rapide et des apports allochtones plus importants en cas de perturbations pour les mardelles

de petites surperficies.

2.4 Dynamique temporelle de végétation

Les espèces floristiques, caractéristiquent des mares intra-forestières, identifiées précédemment sont utilisées afin de reconstruire des diagrammes polliniques des changements de la végétation implantés sur la structure depuis leur création (*cf. Chapitre 2*). Les taxons polliniques correspondant sont présentés dans un diagramme simplifié regroupant les ligneux (*Alnus*, *Betula* et *Salix*), les herbacées méso-hygrophiles (Cyperaceae, Poaceae, *Alisma plantago-aquatica*, *Filipendula*-type), les plantes aquatiques (*Potamogeton*, *Sparganium*-type, *Nymphaea*, *Typha latifolia*), les espèces de tourbières (*Menyanthes trifoliata*, *Calluna* et *Drosera*), les sphaignes (*Sphagnum*), les fougères (monolètes et trilètes).

Un diagramme pollinique très simplifié de l'évolution des principaux taxons arboréens (*Carpinus*, *Quercus*, AP/T) et des indices d'anthropisation (IPA + Cérales) est présenté en parallèle. Il permet de mettre en relation les changements de végétation sur la mardelle et les perturbations anthropiques de son environnement.

2.4.1 Analyses polliniques des mares tourbeuses et comblée (Bisping)

Les séquences polliniques d'Assenoncourt (ASS) (Fig. 7.4), du Römersberg (RÖM) (Fig. 7.5), de Sarrebourg (SAR) (Fig. 7.6) et de St Jean (STJ) (Fig. 7.7) reconstituent la dynamique végétale de ces structures depuis leur formation jusqu'à atteindre leur colonisation végétale actuelle de tourbière à sphaignes (T6). La mardelle de Bisping (Fig. 7.8) est actuellement une structure comblée, localisée dans une prairie, elle ne correspond donc à aucune des classifications (T1 à T6) décrite précédemment.

2.4.1.1 Les étangs à hygrophiles et les saulaies

Certaines structures (STJV1, RÖMV1) sont colonisées par *Salix* pouvant correspondre à *Salix aurita* car l'on retrouve aujourd'hui cette espèce sur les mares hors contexte forestier (Hérault & Thoen, 2008). Des méso-hygrophiles telles que *Alisma plantago-aquatica* et *Filipendula*-type sont associées à ces saulaies.

D'autres structures (SARV1, BISV1) ne présentent aucun ligneux autour de ces mares mais de nombreuses herbacées en bordures (Cyperaceae, *Alisma plantago-aquatica* et *Filipendula*-type) ainsi que des plantes aquatiques dans la structure (*Myriophyllum*, *Sparganium*-type et *Potamogeton*). Ce type de végétation pourrait correspondre actuellement à une association phyto-sociologique tel que un herbier immergé à Potamogeton (*Potametum lucentis*) (Hueck, 1931) que l'on retrouve aujourd'hui dans les queues d'étangs et les mares, aux eaux eutrophes

d'une profondeur variable (0,5 à 7 m). Ce type de groupement n'est actuellement identifié sur aucune des mardelles inventoriées dans notre zone d'étude.

2.4.1.2 Les aulnaies marécageuses (T4), à sphaignes (T5)

Dans un contexte général de fermeture du milieu autour de ces mares, le passage sous canopée entraîne l'implantation d'*Alnus glutinosa*, cette espèce étant actuellement caractéristique des mares intra-forestières (Hérault & Thoen, 2008).

Il se pose la question de savoir, sans données carpologiques, à partir de quel pourcentage pollinique peut-on envisager l'implantation d'aulne sur ces mares puisque les pourcentages polliniques d'*Alnus* ne sont jamais nuls sur nos séquences. La pluie pollinique actuelle réalisée à Assenoncourt nous renseigne sur ce point. En effet, des pourcentages de pollen d'aulne d'environ 10% sont enregistrés tout le long du transect et retranscrivent donc les apports externes « standard » de ce pollen (*cf. Chapitre 5*).

Les modifications paysagères autour des mares influencent fortement le développement de cette essence et l'implantation des espèces aquatiques et hydrophiles. Ainsi la structure de Sarrebourg (SAR) passe sous couvert forestier à partir de 1750 cal. BP (SARV2) puis s'y développe une aulnaie avec au centre de la structure la subsistance de certaines plantes aquatiques (*Potamogeton*, *Sparganium*-type) et le développement de *Nymphaea* (*cf. Fig. 7.6*). Selon Catteau *et al.* (2009), la grande productivité du groupement écologique précédent (potentiellement *Potametum lucentis*) participe à un processus d'attèrissement permettant le développement du *Nymphaeo albae - Nupharetm lutae* caractérisé par *Potamogeton natans* et *Nymphaea alba*. Par la suite, les taxons polliniques de plantes aquatiques disparaissent alors que les sphaignes se développent créant ainsi une aulnaie à sphaignes (SARV3).

À Bisping (BISV2), cette dynamique est pratiquement identique mais à une période chronologique différente et initiée par un développement rapide du saule lors du changement paysager (prairie/forêt) avant l'installation d'une aulnaie sur la mare (*cf. Fig. 7.8*).

Cette dynamique est perturbée dans les autres enregistrements polliniques (ASSV1, RÖMV2, STJV2) par l'anthropisation et les changements paysagers autour des structures au cours de la période médiévale. À Assenoncourt (ASS) (*cf. Fig. 7.4*) et Saint Jean (STJ) (*cf. Fig. 7.7*), le développement d'une aulnaie (ASSV1) avec la présence de plusieurs plantes aquatiques (*Nymphaea*, Potamogeton et *Sparganium*-type) est interrompu par un changement paysager (ASSV2, STJV2) entraînant la disparition de l'aulne mais favorisant le développement de plantes herbacées (*Alisma plantago-aquatica*, Cyperaceae, *Filipendula*-type, *Potentilla*-type et *Menyanthes trifoliata*) et de plantes aquatiques (*Potamogeton*, *Typha latifolia* et *Sparganium*-

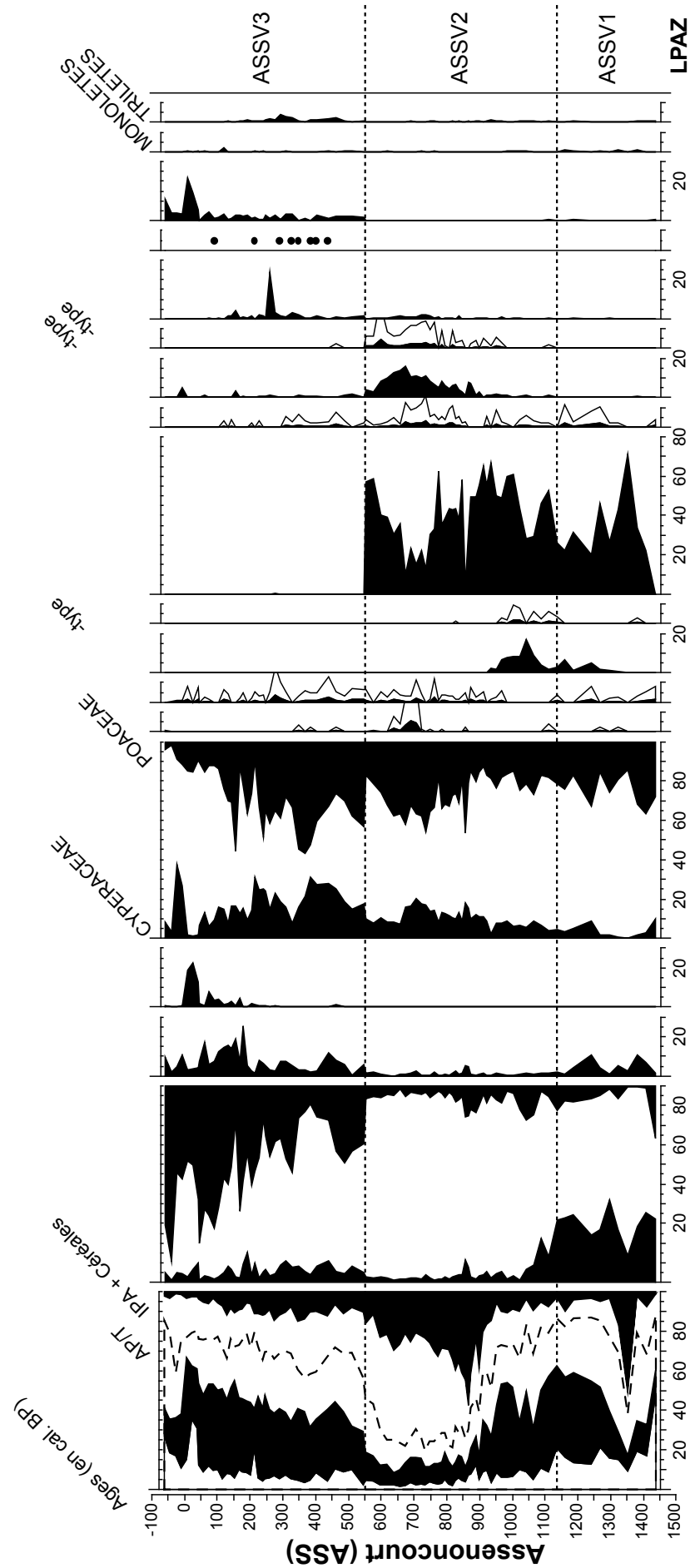


Figure 7.4 - Diagramme pollinique de la végétation typique des mardelles sur la séquence d'Assenoncourt (ASS) Les coubes de Carpinus, Betula, AP/T et IPA + céréales proviennent du diagramme d'anthropisation (cf. Chapitre 5). La courbe IPA + Céréales regroupent plusieurs taxons polliniques, *Cerealia*-type, *Secale*-type, *Cannabis/Humulus*, *Artemisia*, *Centaurea cyanus*, *Centaurea jacea*, Chenopodiaceae, *Fagopyrum*, *Papaver*, *Plantago lanceolata*, *Plantago major/media*, *Polygonum aviculare* et Urticaceae.

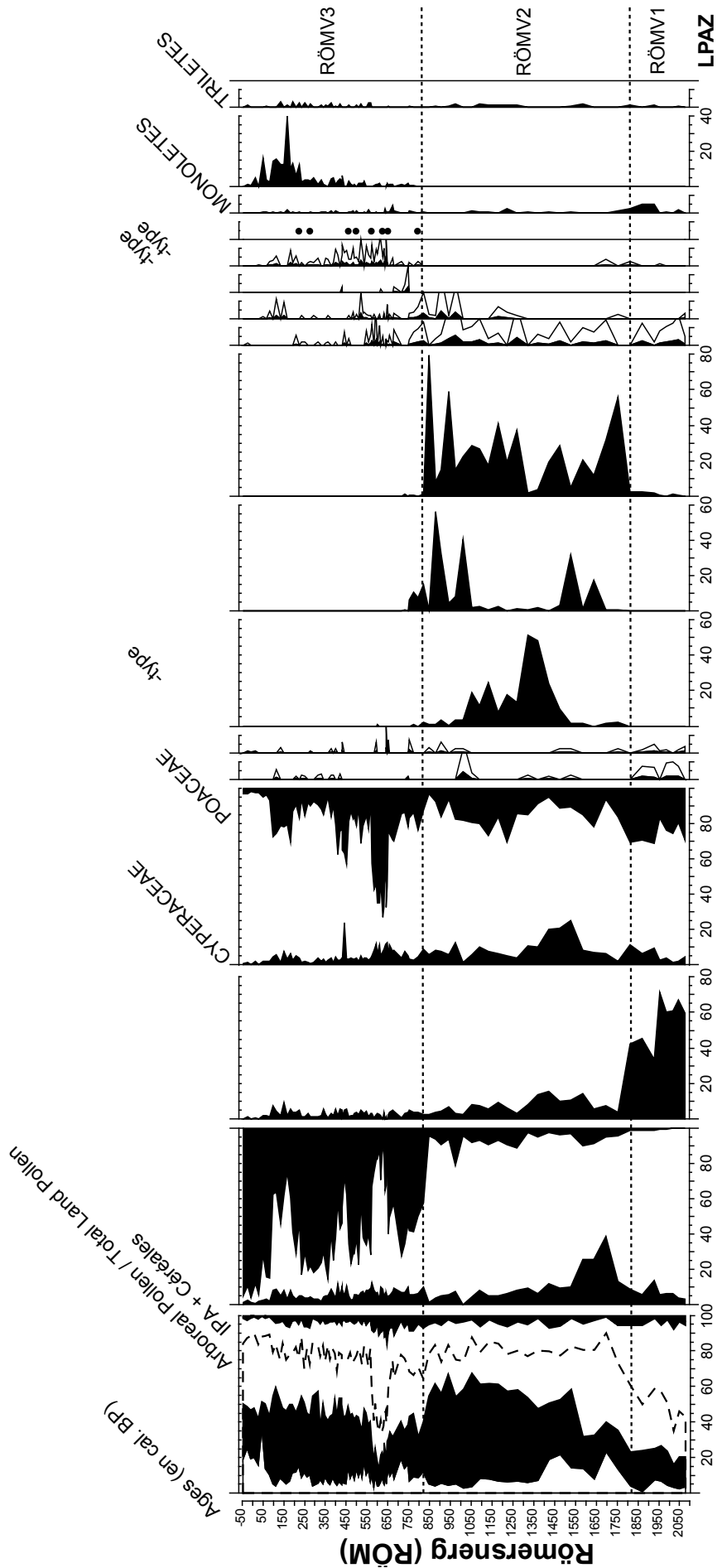


Figure 7.5 - Diagramme pollinique de la végétation typique des mardelles sur la séquence du Römersberg (RÖM). Les coubes de Carpinus, Betula, AP/T et IPA + céréales proviennent du diagramme d'anthropisation (cf. Chapitre 5). La courbe IPA + Céréales regroupent plusieurs taxons polliniques, Cereali-type, Secale-type, Cannabis/Humulus, Artemisia, Centaurea cyanus, Centaurea jacea, Chenopodiaceae, Fagopyrum, Papavere, Plantago lanceolata, Plantago major/media, Polygonum aviculare et Urticaceae.

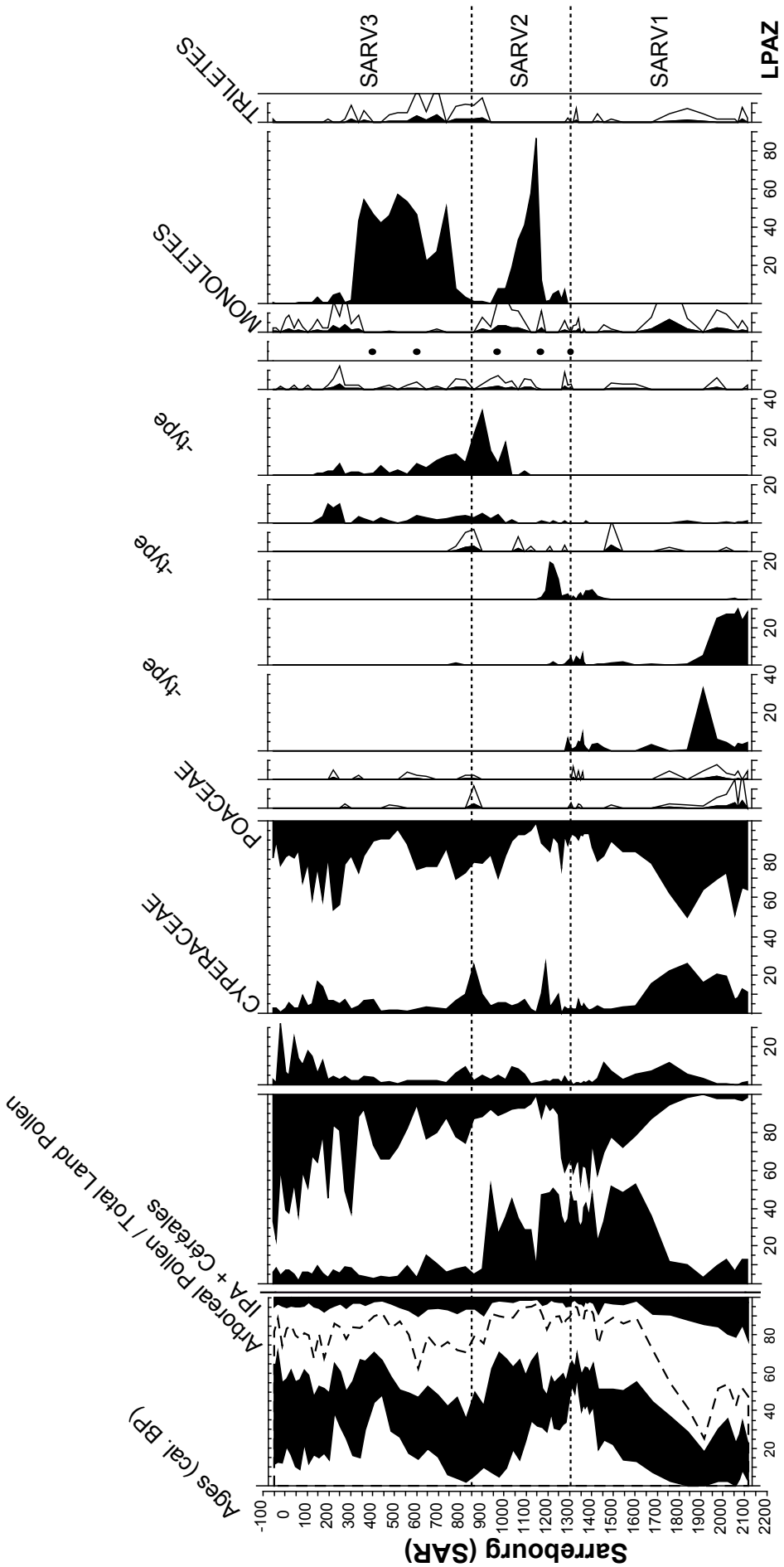


Figure 7.6 - Diagramme pollinique de la végétation typique des mardelles sur la séquence de Sarrebourg (SAR). Les coubes de Carpinus, Betula, AP/T et IPA + céréales proviennent du diagramme d'anthropisation (cf. Chapitre 5). La courbe IPA + Céréales regroupent plusieurs taxons polliniques, Cereali-type, Secale-type, Cannabis/Humulus, Artemisia, Centaurea cyanus, Centaurea jacea, Chenopodiaceae, Fagopyrum, Papavere, Plantago lanceolata, Plantago major/media, Polygonum aviculare et Urticaceae.

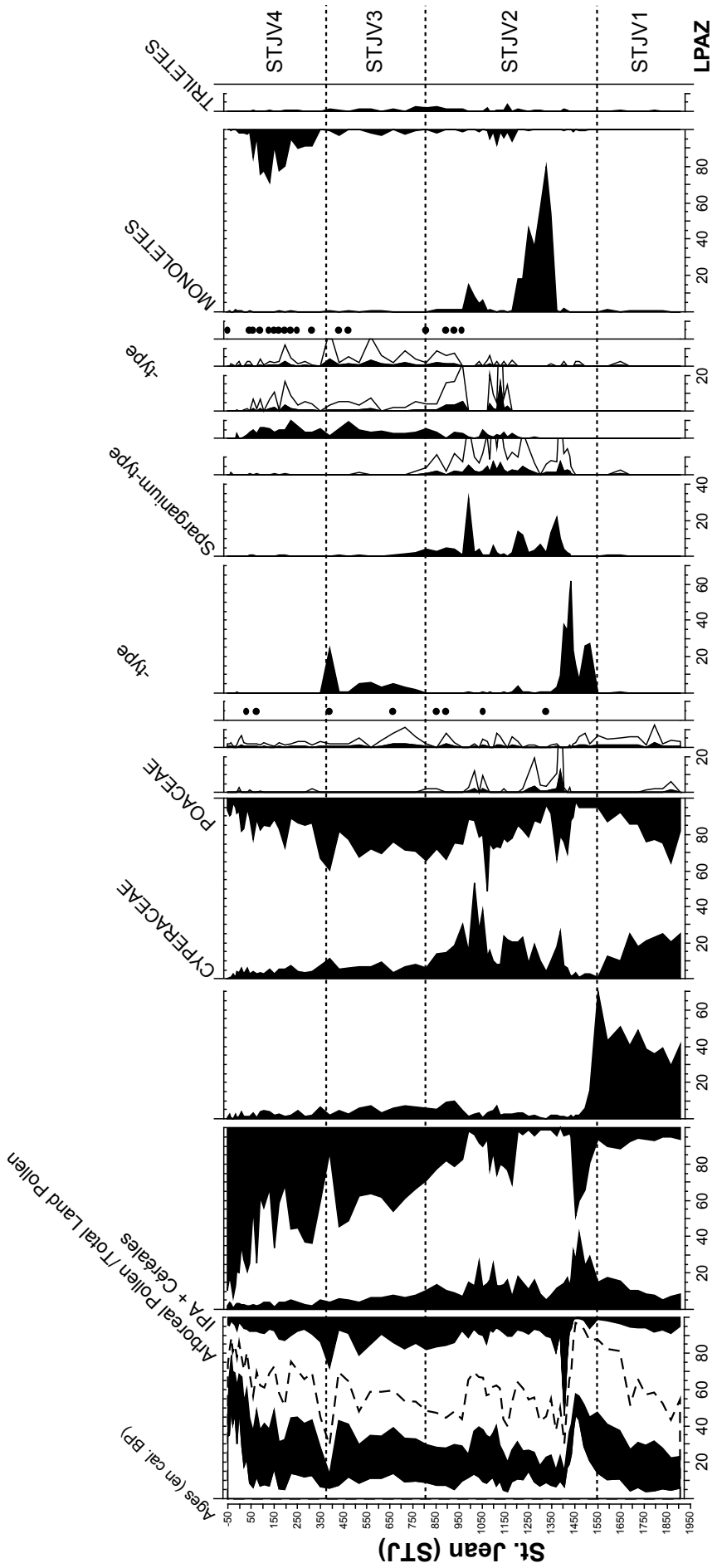


Figure 7.7 - Diagramme pollinique de la végétation typique des mardelles sur la séquence de Saint Jean (STJ). Les coubes de Carpinus, Betula, AP/T et IPA + céréales proviennent du diagramme d'anthropisation (cf. Chapitre 5). La courbe IPA + Céréales regroupent plusieurs taxons polliniques, Cereali-type, Secale-type, Cannabis/Humulus, Artemisia, Centaurea cyanus, Centaurea jacea, Chenopodiaceae, Fagopyrum, Papavere, Plantago lanceolata, Plantago major/media, Polygonum aviculare et Urticaceae.

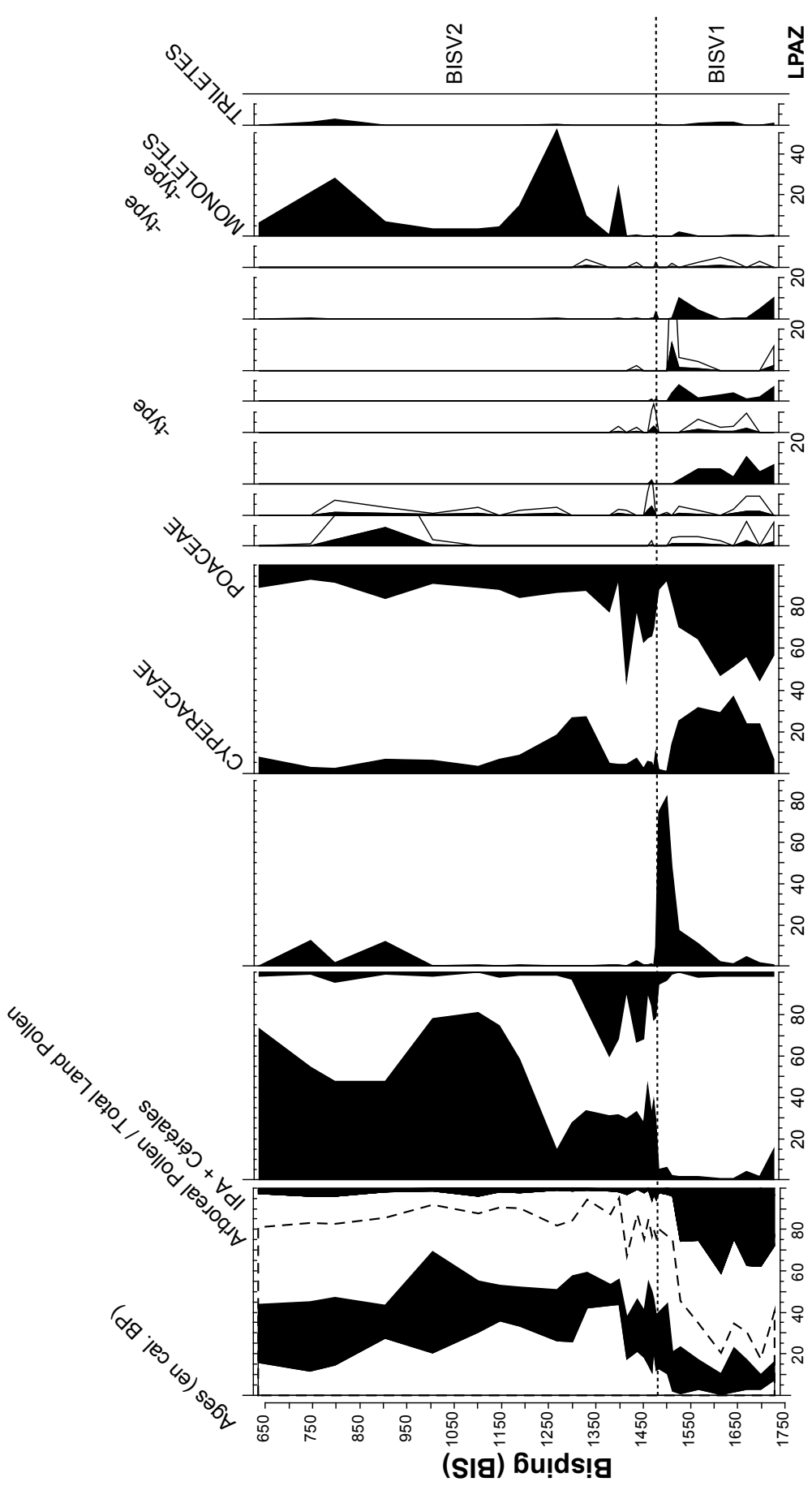
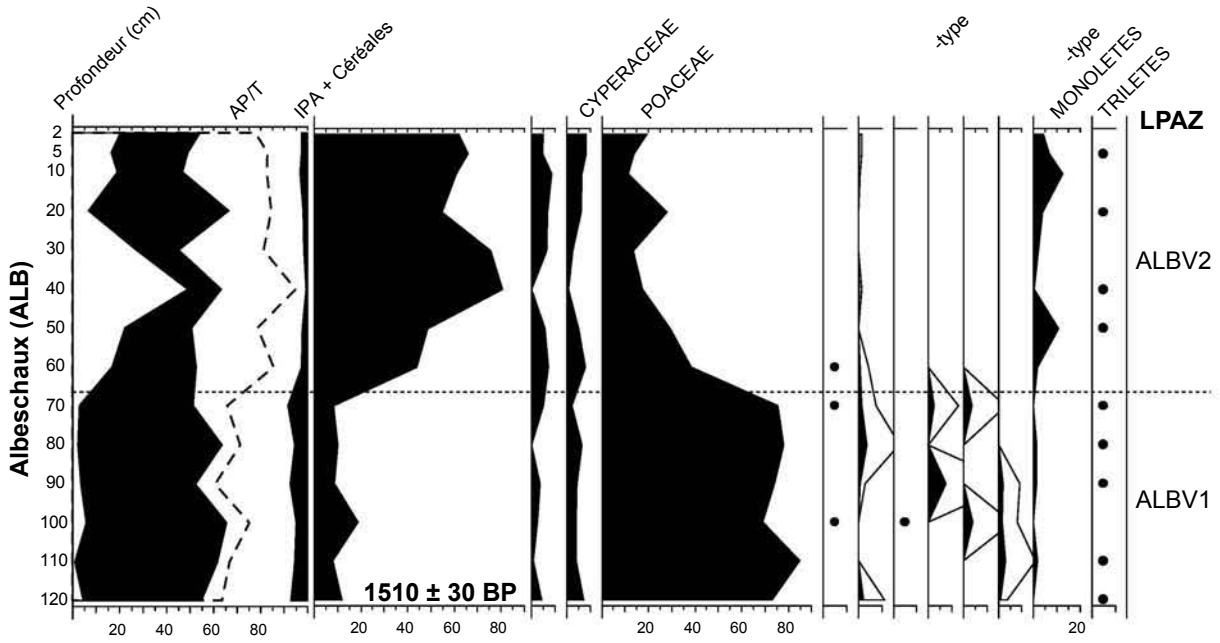


Figure 7.8 - Diagramme pollinique de la végétation typique des mardelles sur la séquence de Bisping (BIS). Les coubes de Carpinus, Betula, AP/T et IPA + céréales proviennent du diagramme d'anthropisation (cf. Chapitre 5). La courbe IPA + Céréales regroupent plusieurs taxons polliniques, Cereali-type, Secale-type, Cannabis/Humulus, Artemisia, Centaurea cyanus, Centaurea jacea, Chenopodiaceae, Fagopyrum, Papavere, Plantago lanceolata, Plantago major/media, Polygonum aviculare et Urticaceae.


Profondeur (cm)
AP/T
IPA + Céréales
CYPERACEAE
POACEAE
-type
-type
MONOLETES
TRILETES
LPAZ
Albeschaux (ALB)
2
5
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120
ALBV2
ALBV1
1510 ± 30 BP
20
40
60
80



type) qui mélangent une végétation de mare et de tourbières de basse altitude.

2.4.1.3 Les boulaies à sphaignes (T6)

En concordance avec les inventaires floristiques actuels, cet état typologique est caractérisé par la domination du bouleau associé à d'autres ligneux tels que *Salix* et *Frangula alnus*, et des spores de sphaignes. Diverses herbacées méso-hygrophiles (Poaceae et Cyperaceae) et typiques des milieux humides acides telles que *Menyanthes trifoliata*, *Potentilla*-type (potentiellement *Potentilla palustris*) ainsi que Ericaceae/*Calluna* y sont implantées. La présence redondante de *Drosera* est identifiée sur toutes nos séquences même si aujourd'hui cette espèce n'est plus présente sur aucune mardelle en Lorraine (L. Godé, communication personnelle).

2.4.2 Analyses polliniques des mares intra-forestières sans végétation (T1)

Les analyses polliniques de la séquence d'Albeschaux (ALB) (Fig. 7.9) ne renseignent que partiellement la dynamique végétale passée d'une structure actuellement sans aucune végétation (T1).Cette mare a été colonisée par une végétation uniquement herbacée (BISV1) avant le développement d'une aulnaie marécageuse (BISV2). La persistence de pollen d'*Alnus* jusqu'à l'échantillon de surface suggére une disparition de cette essence de façon concomittante avec la coupe forestière de la parcelle, il y a environ 10 à 20 ans au vu du peuplement forestier actuel (perchis/gaullis).

Dès lors, la coupe du peuplement sylvicole à pu entraîner une chute de l'évapotranspiration et donc une augmentation des apports hydriques de la mardelle. La remontée brutale du niveau d'eau faisant alors périclite la végétation herbacée et les aulnes. De façon plus pragmatique, l'absence actuelle d'aulnes autour de la mardelle pourrait également être liée à leur coupe par les forestiers lors de l'exploitation sylvicole de la parcelle.

Ceci démontre le rôle particulièrement perturbateur de l'exploitation sylvicole sur ce type de petites mares. Elle entraîne une augmentation rapide du niveau hydrique et un changement important de la luminosité.

2.4.3 Relation entre mode de sédimentation et type de végétation

Les groupements phyto-sociologiques identifiés pour nos mardelles intra-forestières peuvent également être liés aux sédiments sur lesquelles ils se développent. Ainsi la composante organique (MO) et minérale de la sédimentation conditionne l'implantation de la végétation et, de façon rétroactive, influence également ces proportions de MO et d'argiles dans les sédiments dans une vision de dynamique temporelle de colonisation végétale.

Ainsi, nous calculons pour les 380 échantillons dont la proportion de MO est renseignée, la valeur moyenne de MO pour laquelle chaque taxon pollinique est identifié en fonction de la fréquence d'identification de ce taxon dans les données polliniques fossiles (Fig. 7.10).

Cette représentation graphique différencie trois groupes de végétation selon la proportion de MO. Sous les valeurs médianes (> 62%) de matière organique (MO), nous identifions des taxons polliniques de plantes aquatiques et hydrophiles telles que *Myriophyllum*, *Nuphar*, *Nymphaea*, *Potamogeton* et *Sparganium*-type. Ces espèces de milieux aquatiques nécessitent une lame d'eau de plusieurs mètres et une forte luminosité, correspondant à une végétation de petits étangs peu profonds ou de queues d'étangs (Ellenberg, 1988 ; Hill *et al.*, 1999).
Autour de la valeur médiane de matière organique, nous retrouvons deux ligneux (*Salix* et *Alnus*) très souvent identifiés sur nos structures actuelles, ainsi que plusieurs taxons polliniques de plantes herbacées telles que *Potentilla*-type, Cyperaceae et Poaceae.
Et pour les valeurs de matière organique supérieures à la médiane, nous retrouvons des taxons polliniques d'espèces typiques des milieux tourbeux acides tels que *Betula*, *Sphagnum*, *Calluna*, *Menyanthes trifoliata* et *Drosera*.

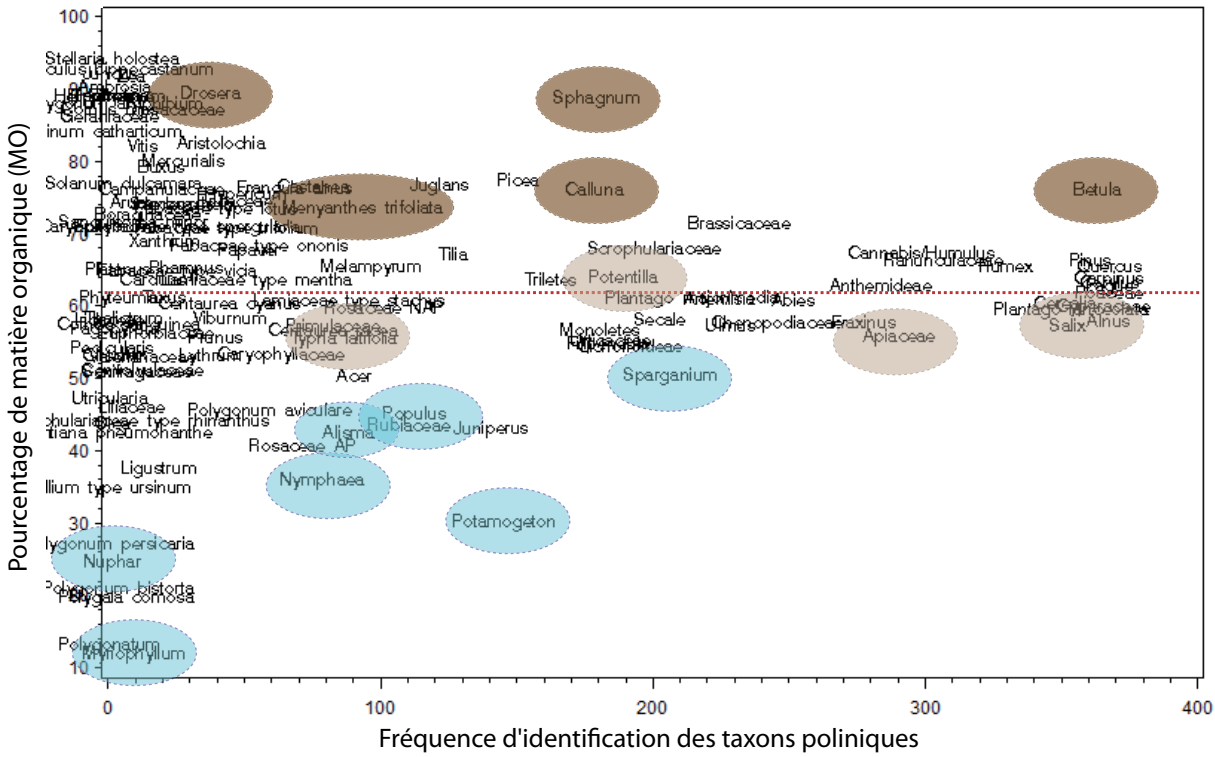


Figure 7.10 - Graphique représantant les fréquences d'identifications des taxons polliniques dans les données polliniques fossiles en fonction du pourcentage moyen de MO des sédiments dans lesquels ces taxons sont identifiés, la ligne rouge pointillée correspond à la valeur moyenne de MO pour tous les échantillons.

Une fois cette caractérisation des sédiments replacée dans une logique temporelle de sédimentation des mardelles, ce graphique pourrait revéler la dynamique de comblement de ces structures.

2.4.4 Analyse en Composante Principale (ACP)

L'analyse en composante principale réalisé sur 393 échantillons de 7 sites dissocie un troisième axe n'expliquant qu'une faible variance (4%) de nos données mais celui-ci est corrélé ($r^2 = 0,45$) de façon très significative ($P < 0,001$) avec la teneur en matière organique (MO) des sédiments, quantifiée grâce aux mesures de perte au feu (*cf. Chapitre 2*).

Ce troisième axe est corrélé dans les valeurs positives avec des taxons polliniques de plantes aquatiques (*Potamogeton*, *Nymphaea* et *Sparganium*-type), de plantes méso-hygrophiles (*Potentilla*-type, *Filipendula*-type et Cyperaceae) et de plantes cultivées (*Cerealia*-type et *Secale*-type) ; opposé pour les valeurs négatives à des taxons polliniques d'espèces de tourbière (*Betula*, *Sphagnum* et *Drosera*), de méso-hygrophiles potentielles (Brassicaceae) et de ligneux (*Pinus*, *Picea*, *Quercus, Castanea* et *Juglans*) (Fig. 7.11a).

La répartition des taxons polliniques contribuant à cet axe 3 de l'ACP sur le graphique, mettant en relation les fréquences des taxons polliniques avec matière organique du sédiment (*cf. Fig. 7.10*), démontre une disposition très dichotomique de ces taxons. Ainsi les taxons polliniques contribuant négativement à l'axe 3 de l'ACP se retrouvent dans les échantillons aux proportions de matière organique supérieures à la moyenne (62%) et à l'opposé pour les valeurs positives.

La représentation des scores des ACP sur l'axe 3montre une tendance générale de nos échantillons, pour quasiment toutes les mardelles, à un déplacement plus ou moins rapide depuis le pôle le plus aquatique vers le pôle le plus atterri de l'axe 3, ce qui traduit le passage d'un système « lacustre » (STJV1, SARV1, ASSV1, RÖMV1) ou d'aulnaie marécageuse pour les valeurs positives, à un système tourbeux pour les valeurs négatives et retranscrit également le changement d'origine (allochtone à autochtone) de la matière organique (Fig. 7.11b).

3. Discussion et conclusions

3.1 Dynamique végétale des mardelles forestières

Comme le proposait Braque (1966), «deux dépressions, l'une actuellement à l'état de mare, l'autre de tourbière, ne sont pas nécessairement d'âges différents ». En effet, les seules variables entre toutes ces mardelles sont leur localisation topographique (sommitale ou haut de versant) mais surtout leurs superficies puisque les autres paramètres (la profondeur, la date et le contexte de création) se révèlent être très homogènes. La superficie couverte est une variable déterminante car elle influence indirectement la luminosité au sol, la vitesse de comblement et le nombre d'espèces quelle abrite en effet « *la probabilité de survie d'une espèce et l'hétérogénéité de*

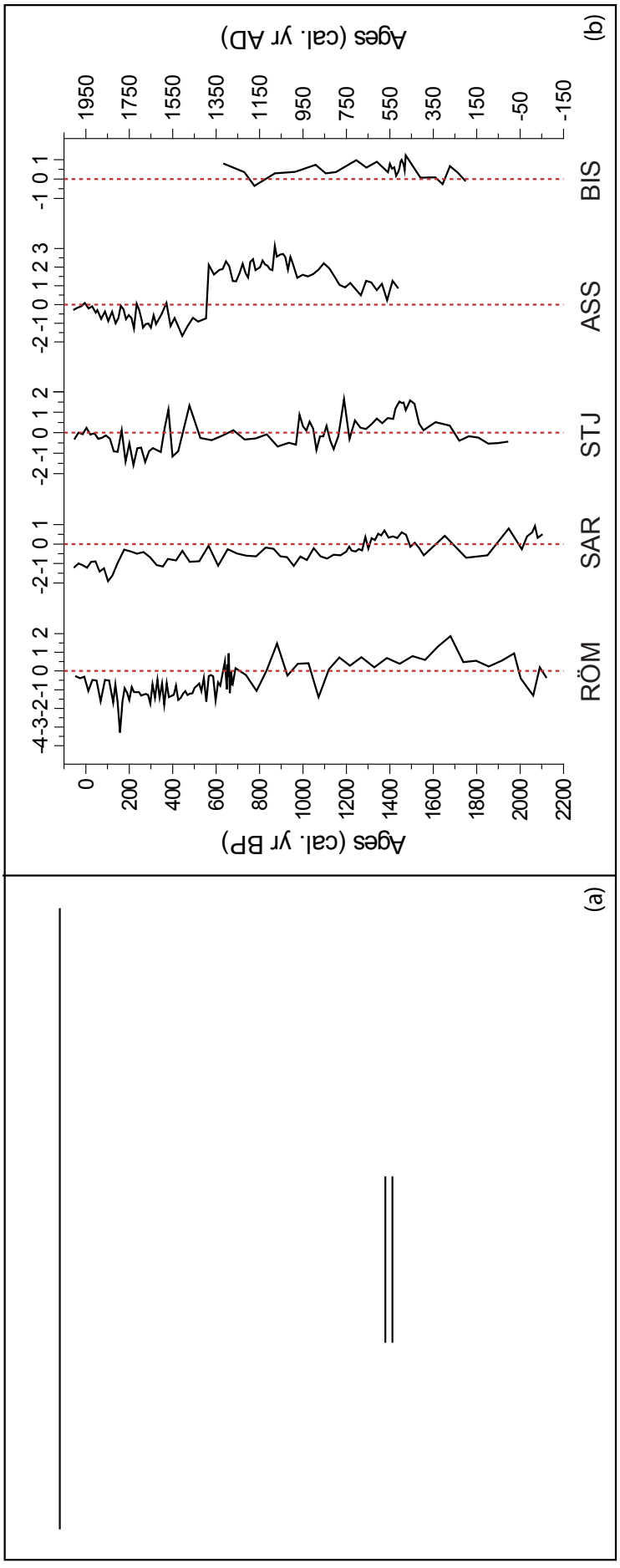


Figure 7.11(a-b) - Tableau (a) des taxons polliniques contribuant majoritairement aux scores de l'ACP sur l'axe 3 et le pourcentage de matière organique pondérée par échantillons où ces taxons sont identifiés. Ces variations de scores de l'ACP pour l'axe 3 sont reconstruites (b) pour les séquences de Römersberg (RÖM), Sarrebourg (SAR), St. Jean (STJ), Assenocnourt (ASS) qui sont actuellement des boulaies acides à sphaignes (T6) et de Bisping (BIS) qui est une structure actuellement comblée.

l'habitat augmente avec la taille » (Rosenzweig, 1995 ; Thoen & Hérault, 2006). Leurs positionnements topographiques influencent la nature de leurs apports hydriques (tellurique / pluvial), les structures en position sommitale ne bénéficiant pas du tamponnage par les eaux de ruissellement.

La typologie proposée par Hérault & Thoen (2006) ne prend volontairement pas en compte la composante ligneuse car ils peuvent s'être établis « *quand les conditions stationnelles pouvaient être différentes de celles rencontrées précédemment* ». A l'opposé dans ce document, nous nous focalisons justement sur la composante ligneuse. Ceci se justifie par les analyses sédimentaires, polliniques et statistiques qui démontrent un logique de colonisation et de dynamique végétale principalement par ces trois ligneux (aulne, saule et bouleau) sur une échelle temporelle longue et liée à la dynamique de comblement de ces dépressions. Cette dynamique n'est pas facilement perceptible sans l'utilisation de données paléoenvironnementales.

La prise en compte de ces variables permet de proposer un schéma évolutif intégrant l'ensemble des paramètres physiques et des modifications du contexte paysager (Fig. 7.12).

Ainsi, les données sédimentaires, palynologiques et les analyses ACP démontrent la création de ces mares sous la forme d'un système « lacustre » dans un contexte non forestier marqué par une sédimentation argileuse très pauvre en matière organique. Selon les données palynologiques, ces structures sont alors colonisées par des plantes aquatiques (*Myriophyllum*, *Nuphar*, *Nymphaea*, *Potamogeton*) et des herbacées méso-hygrophiles (*Alisma plantago-aquatica*, cyperaceae et poaceae) mais certaines d'entre elles sont plutôt bordées par des saules. Ces taxons polliniques correspondent à certaines espèces (*Potamogeton natans*, *Alisma plantago-aquatica*, *Salix cinerea*) identifiées sur des dépressions actuellement implantées en contexte prairial (Hérault & Thoen, 2009). Ce type d'association végétale n'est plus identifié sur des mardelles actuelles que ce soit en milieu ouvert ou forestier.
Par la suite, le développement de forêts autour d'elles entraîne une diminution de la luminosité et une modification de l'apport sédimentaire. Dès lors, les structures suivent une dynamique naturelle de comblement influencée par la nature (argiles/MO) et l'origine (allochtone/autochtone) des apports de matériaux conditionnant l'évolution de ces systèmes au cours du temps. Toutes les structures analysées, même celles actuellement sans végétation, sont alors colonisées par *Alnus glutinosa*, espèce typique des mardelles intra-forestières actuelles (Hérault & Thoen, 2009). La quantité de matière organique augmente dans la matrice argileuse et se traduit par une accumulation stratifiée de dépôts de feuilles provenant des ligneux de la canopée et de ceux

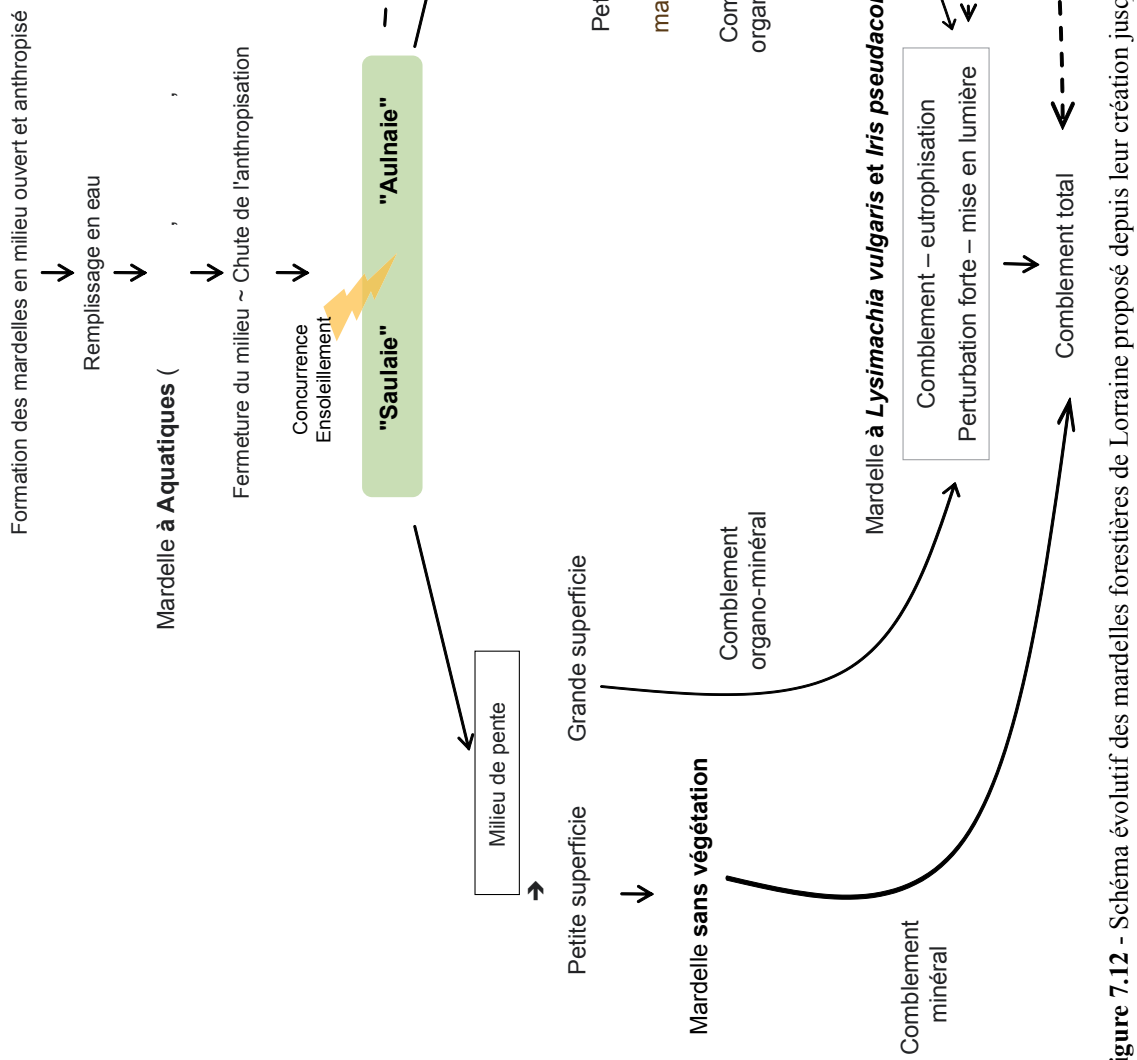


Figure 7.12 - Schéma évolutif des mardelles forestières de Lorraine proposé depuis leur création jusqu'à leur comblement et en prenant en considération leurs caractéristiques de taille et d'implantation topographique.

implantés sur la structure.

Certaines des mardelles peuvent suivre une dernière évolution avec le développement de sphaignes. Les mares tourbeuses possédent des grandes superficies et sont généralement localisées en position topographique sommitale possédant donc un bassin versant quasiment nul. Ceci favorise un apport hydrique très majoritairement pluvial, à pH neutre, et peu d'apport d'eaux de ruissellement qui sont plus basiques.

L'implantation de sphaignes est possible sur des substrats émergés mais offrant un engorgement hydrique et des conditions d'acidité suffisantes (Manneville *et al.*, 1999). Dans le cas des aulnaies, les sphaignes sont implantées au pied de ces arbres sur du matériel organique (feuilles, débris divers) en décomposition. Puis *Sphagnum* se développe jusqu'à former un tapis ou radeau de sphaigne dont les conditions d'acidité extrêmes, avec un pH à 4, sont plus favorables au bouleau (*Betula pubescent*) plutôt qu'à l'aulne (Ellenberg, 1988).

Pour les structures de petites superficies, le comblement argilo-organique et la faible luminosité au sol défavorise l'installation de végétation.

L'un des points que nous n'avons pas appréhendé dans cette dynamique de végétation correspond aux variations de leur état hydrique en fonction des conditions paysagères et des pratiques sylvicoles. En effet, lors de coupes forestières préalables aux fouilles archéologiques sur la bande LGV, l'état hydrique des mares a été affecté par ce bouleversement paysager brutal provoquant une augmentation rapide de la lame d'eau. Cette augmentation brusque du niveau d'eau pourrait entraîner la disparition d'une partie de la végétation pouvant expliquer, peut-être, la disparition d'aulnaies sur les structures les plus petites et l'absence actuelle sur certaines d'entre-elles de toute végétation ligneuse et herbacée.

3.2 Apport actuel des mares forestières à la biodiversité en Lorraine

La végétation de ces milieux humides diverge fortement du contexte forestier au sein duquel elles sont implantées. Pour la majorité, les mardelles intra-forestières peuvent être assimilées à des aulnaies marécageuses ou à des queues d'étangs mais leur apport à la biodiversité floristique régionale est indéniable. Des espèces végétales rares ou peu fréquentes en Lorraine sont très souvent identifiées (*Carex elongata* et *Carex rostrata*) dans ces structures. On retrouve également quelques stations d'espèces rares (*Salix aurita*, *Carex nigra*, *Epilobium ciliatum* ou *Chrysosplenium oppositifolium*) dans ce contexte géographique dans certaines mardelles sur le Plateau lorrain. Ainsi, ces mares forestières participent réellement à la diversité spécifique et écosystémique du Plateau lorrain et jouent un rôle majeur en tant que corridor biologique permettent la colonisation de nouveaux espaces (talus, queues d'étangs, marais) (Hérault & Thoen, 2009).

Les mares tourbeuses ne représentent qu'une infime proportion (1 à 2%) des mares inventoriées toutefois ce type de tourbières acides à sphaignes, par la richesse et la diversité floristique qu'elles abritent, en fond des milieux à haut intérêt écologique et patrimoniale dans ces contextes de basse altitude (300 m) sur les sols argilo-marneux du Plateau lorrain. Toutefois, les mares sans végétation ne sont pas sans intérêt biologique car ils se révèlent être des milieux idéaux pour la reproduction de l'herpétofaune et abritent de nombreuses espèces d'amphibiens.

L'étude intégrée de ces mares démontre également le rôle essentiel de l'homme et de son intervention dans la richesse écologique observée et protégée aujourd'hui sur ces milieux et participant à la biodiversité de cette région. La destruction par l'homme des zones humides n'est donc pas une constante au cours des temps historiques. Ainsi la création de ces mardelles par l'homme il y a près de 2000 ans a entrainé la formation de milliers de milieux humides abritant une richesse écologique actuellement protégée. Cet impact des pratiques anthropiques anciennes sur la création de milieux humides est une réalité dans plusieurs régions en France (Cubizole *et al.*, 2001). Le cas des mardelles, en tant que mares intra-forestières, en est un parfait exemple. Sajaloli (2007) affirme avec force le fait que « *dans leur immense majorité les mares sont des constructions humaines. Les écosystèmes qu'elles acceuillent, quelle que soit leur richesse biologique, sont de ce fait d'origine anthropique. [...] Retracer l'histoire des mares n'est donc plus un détour, élégant mais obligé, mais bien une nécessité impérieuse pour protéger ces milieux*».

3.3 Gestion et conservation de la biodiversité des mardelles intra-forestières

Nombre de ces mares sont implantées dans des zones naturelles protégées (ZNIEFF) ou à haute valeur patrimoniale (zone *Natura 2000*). Le rôle de ces organismes est de maintenir la diversité des milieux de ces zones géographiques en prenant en compte les besoins socio-économiques actuels. Cette politique nécessite la création de prérogatives aux gestionnaires forestiers privés et publiques pour la protection et la valorisation de ces milieux et de leur biodiversité.

L'étude des remplissages sédimentaires démontrent une dynamique naturelle de comblement à partir d'un système semi-lacustre puis, au fur et à mesure, l'implantation d'aulnaies marécageuses et pour une faible proportion d'entre-elles (environ 5%), la formation de tourbières acides à sphaignes (*Betula pubscens*, *Sphagnum palustre*). La richesse floristique spécifique de ces mares tourbeuses intra-forestières est indéniable car on y retrouve de nombreuses espèces normalement identifiées dans des contextes montagnard ou semi-montagnard.

Selon Catteau *et al.* (2009), les groupements phyto-sociologiques de type *Sphagno palustris-Betuletum pubscentis* évoluent lentement par asséchement vers une chênaie acidiphile (*Quercion*

roboris). A une échelle chronologique centennalle, leur dynamique naturelle sera donc certainement de s'assécher et d'être intégrée au système forestier environnant. Cette dynamique est illustrée par plusieurs cas dans notre zone d'étude, avec par exemple la disparition naturelle de la station de *Menyanthes trifoliata* sur la mardelle du Römersberg (RÖM) (Ritz, communication personelle). D'un point de vue paléobotanique, on retrouve un cas identique avec l'identifcation de grains de pollen de *Drosera* sur toutes nos séquences paléobotaniques, cette espèce n'étant pourtant plus référencée actuellement sur aucune mardelle en Lorraine (L. Godé, communication personnelle).
La conservation des espèces floristiques patrimoniales et la volonté de restaurer la richesse écologique ancienne de ces milieux est un objectif des politiques locales pour les mardelles et pour les milieux humides en général Ces propositions de gestion des mares intra-forestières sont souvent calquées et reprises des méthodes mises en place sur les milieux humides de grandes taille (marais, tourbières) et implantées au sein de grands espaces ouverts. Malheureusement, les spécificités de taille et l'implantation sous canopée sont à prendre en compte dans les différentes consignes de gestion envisagées.

Sur les grandes tourbières, la dynamique d'asséchement peut-être enrayée par des coupes **douces** des ligneux ce qui va diminuer l'évapotranspiration, augmenter la hauteur de la nappe et engendrer l'apparition d'espèces héliophiles des bas-marais. Des coupes franches entraînerait de façon certaine une explosion de la luminosité, du régime hydrique et une décomposition de la matière organique. Cette méthodologie appliquée aux mardelles pose de nombreux problèmes liés au piétinement du radeau de sphaignes, lors d'une coupe éventuelle des bouleaux, qui entraînerait une compaction des horizons supérieurs tourbeux et à court terme une explosion de *Juncus effusus* comme nous avons pu l'observer sur une mardelle plusieurs fois prélevées à Assenoncourt.

De même, la coupe des arbres bordant la mardelle est souvent envisagée afin de ralentir le comblement de la structure. Toutefois, cette coupe « à 5 mètres » des arbres autour de la mardelle provoquera une explosion de la luminosité sur les abords et favorisera l'implantation d'espèces héliophiles.
De plus, l'un des points les plus importants est le maintien absolu de l'intégrité de leur morphologie ainsi les prérogatives tels que « le profilage des berges sur toute ou partie de la mardelle » sont à exclure. Cet aménégement des berges ne seraient pas en adéquation avec la morphologie standard de ces milieux démontrée par les fouilles archéologiques et les sondages manuels (*cf. Chapitre 3*).

D’autres consignes comme « la réactivation du réseau de drainage », auquel certaines mardelles ont été rattachées à une période non connue, provoquerait également une diminution rapide de la nappe d’eau.

Il est important d’appuyer le fait que ces mardelles intra-forestières et leurs remplissages sédimentaires sont d’un grand intérêt pour les scientifiques de nombreux domaines (écologues, bryologues, batrachologues, paléoenvironnementaliste, ...) et des archives historiques et paléoenvironnemnetales rares qu’il faut préserver.

Les nombreux ateliers animés sur le domaine du Römerberg depuis des années et la création d’un sentier des mardelles en forêt de Rambervillers dans les Vosges, s’inscrit également dans cette optique de valorisation pédagogique de la richesse écologique de ces milieux mais également de la potentialité historique, archéologique et paléobotanique qu’ils referment.

Conclusions

Ce travail de thèse est centré sur l'étude des mares intra-forestières dans les chênaies-charmaies-hêtraies du Plateau lorrain, appelée « mardelles ». Nous rassemblons ici l'ensemble des questions que nous avons soulevées dans ce manuscrit et les résultats que nous avons obtenus.

Origine et caractérisation des mardelles du Plateau lorrain

Depuis le 19ème siècle, de nombreuses études se sont intéressées à l'origine des mardelles de Lorraine. Toutefois, il a fallu attendre des travaux récents en France et en Belgique pour relancer la réflexion sur leur origine. Dans le cadre de cette thèse, nous apportons de nouvelles données archéologiques, géomorphologiques et paléo-environnementales qui sont confrontées aux différentes hypothèses naturelles ou anthropiques pouvant expliquer leur formation.

Nos observations montrent une grande homogénéité de forme et structure sédimentaire de ces mardelles, remarquablement concordante avec les descriptions issues des fouilles réalisées préalablement en Lorraine et en Alsace. Leur taille varie de 10 à 30 m de diamètre et de 3 à 5 m de profondeur.

Les sondages géologique et les fouilles archéologiques (RFF, 2008 ; Goepp, 2010 ; Gazenbeek, en cours) montrent : (1) l'absence de lentilles de gypse ou sel d'une taille significative dans une zone à forte densité de mardelles, ainsi que l'absence de siphon karstique sous les structures, (2) la concordance horizontale sous les mardelles des couches marneuses de l'amont à l'aval de la mardelle, (3) leur interruption en marches d'escalier au droit des talus, et (4) une morphologie en forme de « baignoire » avec un fond « plat ». Ces éléments morphologiques ne correspondent pas à un phénomène géomorphologique de surface occasionné par une dissolution ou un siphonage karstique, ou par un effondrement du substrat sous-jacent (Delafosse, 1948).

Dans toutes les structures, l'unité sédimentaire (US1) au contact de la marne est formée par du matériel argilo-limoneux bleu-gris, très pauvre en matière organique (< 10%). Les analyses polliniques démontrent que ce sédiment s'est déposé en milieu aquatique au cours du second âge du Fer (La Tène, ~ -200/-50 av. J.-C.) ou de la période Romaine (~ -50/450 ap. J.-C.) dans un paysage très ouvert et marqué par une forte anthropisation pastorale Dès le début de la sédimentation, la mardelle est colonisée par des plantes aquatiques et héliophiles (*Potamogeton*, *Myriophyllum*, *Typha latiolia* et *Sparganium*-type) suggérant donc la présence d'une lame d'eau d'au moins un mètre dès sa formation. Pour certaines structures, le pourtour est colonisé par du saule, correspondant certainement à Salix aurita que l'on retrouve actuellement sur les mardelles en milieux ouverts. Dès leur création, la fréquentation de ces mares par le bétail est attestée

par l'identification de spores de champignons coprophiles (*Sporormiella*-type) à la base de la sédimentation et la découverte, sur le site de Cutting, d'ossements de bovins.
L'utilisation des images LiDAR (Light Detection And Ranging) permet un inventaire complet et une analyse spatiale de leur distribution dans le paysage. Sur les marnes du Keuper, les mardelles sont régulièrement espacées en position topographique sommitale ou sur les hauts de pente. Cette technique LiDAR révèle par ailleurs l'existence de vastes parcellaires agraires fossiles sous forêt, matérialisés par des talus et des terrasses sans ossature pierreuse, jamais décrits jusqu'alors et pratiquement invisibles à l'œil sur le terrain. Les mardelles sont fréquemment placées en haut de parcelle, immédiatement à l'aval du talus amont. Sur les sites où les archives palynologiques des mardelles démontrent une absence d'ouverture postérieure à l'antiquité, ces parcellaires sont très vraisemblablement contemporains de la création ou de l'utilisation des mardelles.

Tous ces éléments confortent l'hypothèse d'un creusement par l'homme de ces mares du Plateau lorrain entre la fin du second âge du Fer et la période Gallo-romaine. Dès lors, ces mardelles doivent être considérées comme des « objets archéologiques » et des marqueurs d'anthropisation.
Le but de ce creusement reste hypothétique et nos résultats soutiennent plusieurs possibilités déjà envisagées dans la littérature et prenant en compte la disparition du matériel excavé lors du creusement de la structure.
Ce matériel a pu être localement utilisé pour la construction en torchis des habitats comme le suggère la découverte de nombreux trous de poteaux et de traces d'habitats à proximité immédiate de la mardelle de Cutting, lors de fouilles de l'INRAP en 2010.
La marne extraite a pu être utilisée pour amender les limons acides environnants. Outre sa teneur en carbonate, la marne contient une teneur élevée en phosphore, par rapport aux limons acides de surface qui pourrait apporter une fertilité supplémentaire.
Enfin la création de réserves d'eau pour l'élevage doit être envisagée comme but primaire, ou utilisation secondaire de l'excavation.
Certaines d'entre-elles sont également utilisées au cours du Haut-Moyen âge en tant que fosse de rouissage du chanvre (Assenoncourt, Saint Jean).

Anthropisation et forêts « anciennes » du Plateau lorrain

Au delà de leur formation, nous avons utilisé les archives sédimentaires des mardelles pour reconstituer l'évolution de la végétation environnant les mardelles depuis 2000 ans et pour décrire les variations de l'anthropisation dans ces chênaies de basse altitude, classiquement considérées comme forêts « anciennes » ou « immémoriales ». L'analyse multi-variée a été appliquée à l'ensemble des taxons végétaux dont les pollens ont été reconnus dans les échantillons

sédimentaires. Cette analyse a fait ressortir deux axes principaux, l'un lié au espaces prairiaux et au pastoralisme, et rassemblant les espèces les plus typiques comme (*Plantago lanceolata*, *Plantago major/media*, Chenopodiaceae, *Centaurea jacea/nigra*, Cichorioideae, Poaceae, ...) et l'autre à l'agriculture, avec en particulier (*Cerealia*-type, *Cannabis/Humulus*, *Secale*-type, *Papaver*, ...).

En préalable, nous avons vérifié, sur une séquence sédimentaire voisine couvrant l'ensemble de l'Holocène (bas marais de Francaltroff), que le développement rapide et intense de l'anthropisation commence seulement à partir du second âge du Fer, de sorte que la période couverte par les mardelles décrit pour l'essentiel l'histoire de l'anthropisation du Plateau lorrain

Au début du second âge du Fer, le paysage est alors très peu forestier (> 40% d'AP/T) et modelé par des pratiques principalement pastorales. Cette pression d'anthropisation est maintenue jusqu'au début du Haut-Empire (~ 0 à 250 cal. BP) mais décroît lentement jusqu'à la fin de l'antiquité tardive (~ 250 à 500 cal. BP). Cette dynamique de la végétation est confortée par l'archéologie ayant mis au jour de nombreuses villas romaines sur le Plateau lorrain appuyée par de grands domaines tels que les villas de Saint-Ulrich et celle de Bassing (Moselle, Lorraine). Les données archéologiques démontrent également l'abandon de certains établissements au cours de l'antiquité tardive et le repli de Decem Pagi (Tarquimpol) derrière de puissantes fortifications.
L'évolution palynologique montre une reforestation rapide jusqu'au Moyen Age classique (~ 900 cal. BP), suivie d'une nouvelle phase d'anthropisation, enregistrée autour de certains sites (Assenoncourt, Saint Jean et Francaltroff). Cette fois, on retrouve plutôt des pratiques agraires avec une production importante de céréales (*Cerealia*-type), du seigle (*Secale*-type) et le développement des cultures du chanvre (*Cannabis/Humulus*), introduit dès le Haut Moyen âge (pics de rouissages du chanvre à 1400 cal. BP à Assenoncourt et Saint Jean. Certaines zones déforestées et exploitées par l'agriculture et l'élevage durant l'âge du Fer et la période Gallo-romaine, ne seront pas ou peu ré-ouvertes durant le Moyen Age (Sarrebourg, Römersberg et Bisping).

L'expansion agricole au cours du Moyen Age classique (révolution agraire médiévale) est un phénomène décrit par des historiens et de nombreuses études paléoenvironnementales en Europe de l'ouest, aussi bien à basse altitude (Enters *et al.*, 2008 ; Stobbe, 1996 ; E. Doyen , communication personnelle) que dans les régions montagneuses (Galop, 1998 ; Tinner *et al.*, 2003 ; Gauthier, 2004 ; Rius *et al.*, 2009). Toutefois, un développement aussi rapide des pratiques agro-pastorales au cours de l'âge du Fer semble être plus inhabituel. Il s'explique très certainement par la

présence du site archéologique du Briquetage de la Seille, zone d'exploitation industrielle du sel durant l'âge du Fer. Au vu des volumes de déblais de production (4, 000, 000 m^3 de débris), cette exploitation nécessitait certainement une main d'œuvre importante et donc une production agro-pastorale suffisante pour répondre aux besoins des populations locales.

A l'échelle de la Lorraine, les périodes de l'Age du Fer et gallo-romaine semblent avoir été des périodes historiques d'intenses défrichements et de mise en valeur agricole des sols. En effet, les recherches archéologiques et LiDAR démontrent la présence de nombreux habitats et parcellaires antiques au sein de grands massifs forestiers pourtant considérés comme « anciens » sur les sommets Vosgiens (Heckenbenner & Meyer, 2004 ; Goubet & Meyer, 2005 ; Georges-Leroy *et al.*, 2007) et les côtes de Moselle (Nancy, Forêt de Haye) (Georges-Leroy *et al.*, 2003, 2008, 2009). Ces espaces ne seront pas forcément re-défrichés au cours de la période médiévale, ceci étayant (1) l'existence d'une plus grande couverture forestière dans certains espaces au cours du Moyen Age par rapport à l'antiquité, mais également (2) une implantation des sociétés médiévales dans des espaces géographiques différents de ceux occupés par les sociétés protohistoriques et antiques.

La dégradation des sols par les pratiques agro-pastorales antiques et médiévales

L'utilisation des mardelles intra-forestières en tant que capteurs sédimentaires des flux érosifs retranscrit une érosion des horizons de surface liée aux pratiques agro-pastorales antiques, de 4 à 15 cm à Sarrebourg et Bisping, et aux pratiques médiévales, de 14 à 18 cm à Assenoncourt. Ainsi, les sols des zones ayant subi une mise en valeur agricole au cours de ces deux périodes chrono-culturelles auraient perdu potentiellement de 20 à 35 cm d'épaisseur. Ces bilans érosifs ont l'intérêt de ne pas prendre en compte les érosions modernes liées à la mécanisation de l'agriculture puisque ces structures sont implantées sous couvert forestier depuis bien plus de 50 ans.

Les valeurs obtenues à Haut-Clocher sont en concordance avec celles obtenues en Allemagne dans des contextes pédologiques et d'anthropisation analogues (Houben, 2008 ; Enters *et al.*, 2008). De façon plus générale, plusieurs études en France et en Belgique (Giguet-Corvex *et al.*, in press) confirment l'impact des ces pratiques agro-pastorales anciennes sur l'érosion des horizons de surface sur le bassin versant.

L'origine des limons étant exogène (apport éolien), l'érosion ne peut donc être compensée par l'altération du socle géologique. L'impact de la perte de sol sur la fertilité agricole est lié à la

profondeur du sol, son amincissement conduisant à une diminution de la fertilité d'autant plus marquée qu'elle exporte la terre fine, riche en éléments fertilisants et en matière organique (Le Bissonnais *et al.*, 2002). En contexte forestier, les sols à marne affleurante ou possédant une couverte limoneuse faible (< à 25 cm) possèdent des propriétés hydriques défavorables pour la végétation du fait de la discontinuité texturale entre limon et marnes (problème d'enracinement), de la présence d'une nappe permanente ou temporaire (problèmes de régénération et de vie des racines) et à une dessiccation importante en période sèche (Brethes, 1976).

Ainsi dans notre zone d'étude, les potentialités agricoles et sylvicoles des sols sont influencées par les différences de dépôts limoneux au cours du Pléistocène. Toutefois ces dépôts originels ont été profondément remodelés par les phases d'érosions successives liées aux pratiques agro-pastorales modernes, mais également de façon non négligeables, par celles de l'antiquité ou de la période médiévale.

L'homme créateur de biodiversité

La pression anthropique sur les différentes composantes des écosystèmes est généralement perçue comme néfaste et destructive pour l'environnement. Ce postulat est particulièrement envisagé pour les milieux humides qui ont largement disparu durant le 20ème siècle sous la pression de l'urbanisation et de l'agriculture. En effet la comparaison des tailles et de la fréquence des mardelles en milieu agricole et forestier démontre un comblement fréquent des mardelles en milieu agricole.

Au sein du Plateau lorrain, les mardelles se révèlent être des milieux humides apportant une réel richesse floristique et faunistique par rapport au milieu forestier environnant. La comparaison de leur composition floristique avec les écosystèmes forestiers, prairiaux et lacustres identifie statistiquement quelques espèces typiques des mardelles (*Alnus glutinosa*, *Carex elongata*, *Glyceria fluitans*, *Carex remota*, ...) et propres aux aulnaies marécageuses.

Comme le proposait Braque (1966), « deux dépressions, l'une actuellement à l'état de mare, l'autre de tourbière, ne sont pas nécessairement d'âges différents ». Plusieurs groupements phytosociologiques sont ainsi identifiés et utilisés afin de proposer une classification des colonisations végétales actuelles de ces mares. Cette typologie est « corrélée » à la superficie couverte par la structure, celle-ci influençant indirectement plusieurs paramètres (la luminosité au sol, la vitesse de comblement et le nombre d'espèces quelle abrite).

Les études polliniques des mares tourbeuses (Assenoncourt, Römersberg, Saint Jean et Sarrebourg) permettent également de comprendre la dynamique de colonisation végétale aboutissant à la formation de ces milieux atypique dans cette région de basse altitude.

Ainsi, toutes les mares sont d'abord colonisées par une végétation héliophile et hygrophile, ou une

saulaie (certainement *Salix aurita*), dans un contexte paysager non forestier. Par la suite, la chute régionale de l'anthropisation provoque un changement paysager autour de nos mares qui passent alors sous couvert forestier. Ceci favorise l'implantation de l'aulne glutineux sur ces dépressions et entraîne une augmentation rapide de la MO liée aux feuilles des arbres de la canopée et de la végétation implantée sur la mare. Ces aulnaies marécageuses poursuivent leur dynamique de comblement et certaines d'entre-elles sont colonisées par des sphaignes (*Alnetum-Sphagnetum*). Cette colonisation entraîne à terme une acidification du milieu et la création d'un radeau flottant (formé par *Sphagnum palustre*, *S. flexuosum* et *S. squarosum*) plus favorable au développement du bouleau pubescent. Ainsi nous obtenons pour quelques rares structures (environ 5% d'entre elles), la formation d'une boulaie acide à sphaigne abritant ou ayant abrité des stations d'espèces floristiques à haute valeur patrimoniale *(Drosera*, *Menyanthes trifoliata*, …).

Ce travail démontre qu'une pratique anthropique au sein d'un paysage marqué par un intense pastoralisme, a engendré 2000 ans plus tard, l'établissement d'un réseau dense de milieux humides abritant une biodiversité floristique et faunistique atypique.
Ces milieux, tout comme les étangs médiévaux établis dans la région du Plateau lorrain (Lindre, Stock et Mittersheim), renferment une réelle biodiversité actuellement protégée par des organismes tels que le réseau Natura 2000 et représentent un enrichissement patrimonial pour ces paysages du Plateau lorrain. Il est intéressant de souligner que mardelles et étangs, où s'abrite l'essentiel des espèces de zones humides, sont le produit de profondes perturbations des paysages au cours des périodes protohistoriques et romaine (mardelles) ou médiévales (étangs).

Perspectives

A la suite de ce travail, plusieurs questions restent en suspens et de nombreuses applications méthodologiques et scientifiques, aussi bien dans le domaine paléoenvironnemental que de l'écologie historique sont envisageables grâce à l'utilisation des mardelles.

Les dépressions fermées en Lorraine, toutes des structures anthropiques ?

La quasi-totalité (hormis Rambervillers) des datations radiocarbone et des études polliniques réalisées dans ce manuscrit l'ont été sur des mardelles implantées sur les marnes du Keuper inférieur.

Désormais, il serait intéressant d'appliquer la même méthodologie à des mardelles situées dans des contextes géologiques et géographiques différents. L'utilisation des outils de prospection géophysique (radar-sol, panneau électrique) devrait permettre de décrire les structures sans mettre en œuvre de méthodes destructives et coûteuses.

En Lorraine, ces travaux pourraient être envisagés sur les dépressions du Bois Sollin (calcaire du Lias), de Dolving (calcaire du Muschelkalk) et du Fallberg (grès vosgien) déjà identifiées dans ce manuscrit, mais également sur des structures appelées « mardelles », dans la Woëvre (Meuse, ouest-Lorraine) identifiées par S. Jaillet (2005) et Millarakis (2001), celles près de Sarre-Union (Bas-Rhin, nord-Alsace) identifiées par P. Nussein (communication personnelle) mais également celles dans la région de Rambervillers (Vosges, sud-Lorraine).

Actuellement en France, les travaux sur les mares en forêt de Sénart (Paris) démontrent ainsi que certaines d'entre-elles ont été crées à l'époque gauloise (-500/-200) et auraient été le site d'extraction de meulières (Gérard Herbuvaux, communication personnelle). A l'opposé, les travaux en cours d'I. Jouffroy (communication personnelle) en forêt de Prémery (Nièvre, Bourgogne) et ceux de Planchais (1966) montrent que les dépressions intra-forestières de cette région sont des dolines colmatées.

Il serait alors intéressant de développer ces études sur les mares que l'on retrouve dans de nombreux massifs forestiers « anciens » sur les terrains sédimentaires d'autres régions en France (Berry, Touraine, Haute-Saône...).

Les mardelles, un outil méthodologique pour les études paléo-environnementales

La petite taille de ces capteurs sédimentaires et la faible superficie de leur bassin versant impliquent une origine locale et majoritairement aérienne des pollens et autres composés enregistrés dans

ces systèmes (Sugita, 1994 ; Chen, 1998). De plus, leur vitesse de sédimentation (3 à 5 m en 2000 ans) offre une résolution d'analyse (7 an/cm en moyenne) permettant des études à haute résolution temporelle.

Puisque on retrouve actuellement ces mardelles dans tous les contextes paysagers, elles se révèlent être des outils méthodologiques idéaux pour de nombreux champs thématiques des études paléo-environnementales.

Relation entre pluie pollinique / paysage / anthropisation

La méthode des analogues actuels nécessite des capteurs de cette pluie pollinique dans un environnement connu. Généralement, ce sont les bryophytes qui sont utilisées pour ce travail, mais leur zone et leur durée de captation (1 à 20 ans) fait débat. L'utilisation de prélèvement d'interface, sur lesquelles des datations au plomb (isotope ^{210}Pb) peuvent assurer un contrôle chronologique précis, posent moins de réserves méthodologiques. Mais, il est plus facile de trouver des bryophytes dans un environnement à renseigner, plutôt qu'un petit système lacustre.

La densité des mardelles (redondance), leur espacement régulier (maillage) et leur localisation paysagère (forêts, champs et prairies) sont des atouts pour ce type de questions méthodologiques. Leur étude pourrait servir à mieux calibrer les biais entre pluie pollinique et peuplement forestier en fonction de leur composition (dominance du chêne, du charme ou du hêtre) mais également du traitement sylvicole de ces essences forestières (taillis, taillis-sous futaie, futaie). De plus, l'implantation de certaines mardelles dans des prairies de fauches ou des prairies pâturées fournira une image pollinique caractéristique de ces pratiques anthropiques.

Le géo-référencement des plans terriers de 1712 des bans de Langatte et de Mittersheim, sur lesquels sont identifiées des mardelles (Annexe 19) (Zeller, 2011), couplé à des études polliniques et des datations précises, permettraient de connaitre précisemment la relation exacte entre changement de la végétation et données polliniques dans le cadre d'un boulversement paysager englobant la mardelle ou à une distance connue.

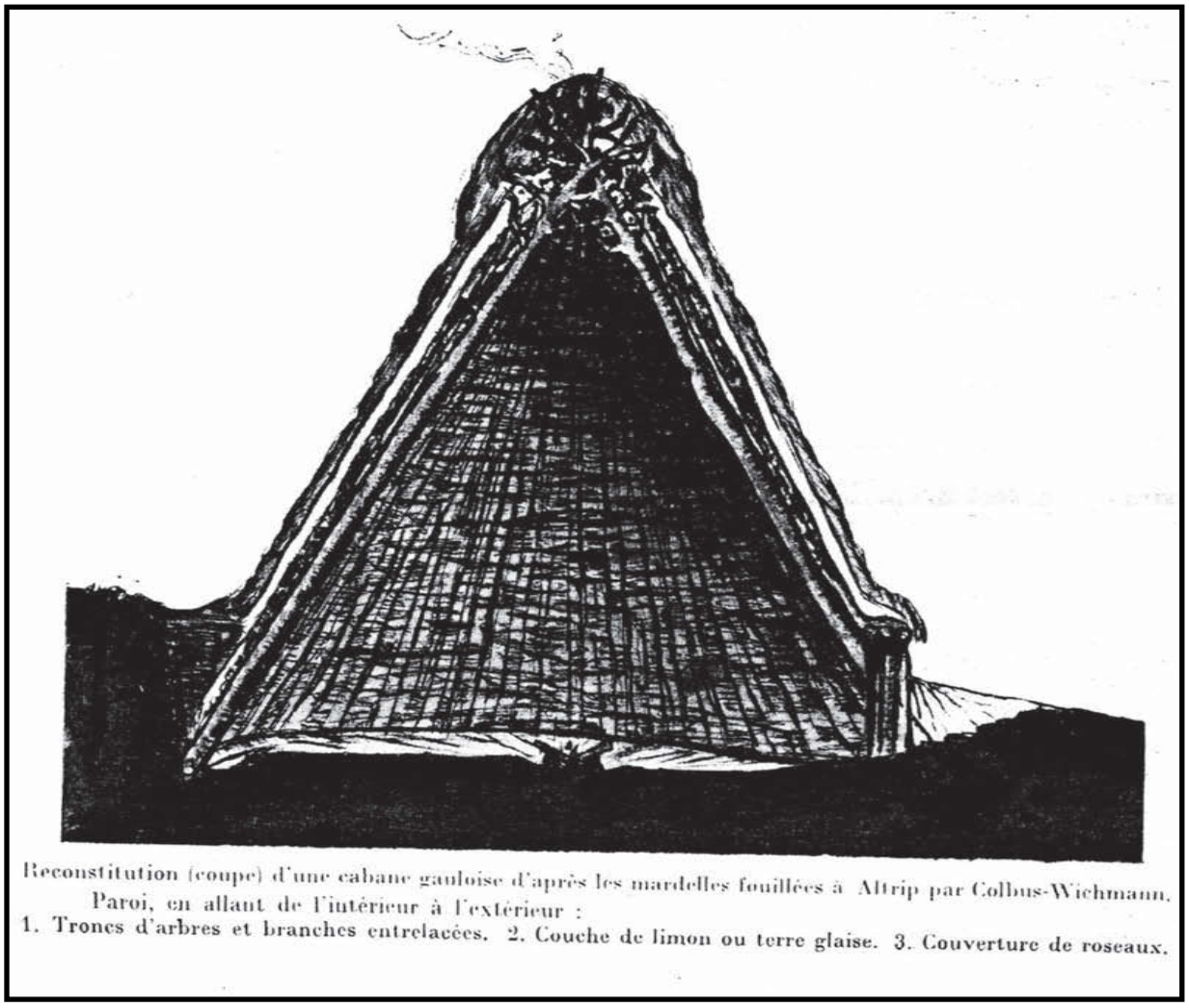
Tous ces résultats pourraient également être intégrés dans la base de données polliniques utilisée pour les calculs des ACP afin de définir de façon plus précise, les taxons polliniques locaux caractérisant les pratiques d'anthropisation (agriculture, pastoralisme, ...) et l'ouverture des paysages.

Archives sédimentaires et reconstitution pédologiques

Ces mardelles sont également des archives sédimentaires des érosions provoquées par les

pratiques agricoles ou pastorales anciennes. Les études géophysiques sont alors particulièrement utiles pour définir l'épaisseur et le volume de chaque US et d'assurer une quantification optimale des cubages sédimentaires. Ces mesures de stocks de sols sédimentés, associés à des mesures de perte au feu, de densité sèche et de datations de ces unités sédimentaires, apporteront de nouvelles données sur les érosions passées des sols aux époques antiques et médiévales. Ce travail est actuellement en cours sur la mardelle de Dolving (DOL) en association avec Christian Camerlynck (Pierre & Marie Curie, Paris VI), Clément Laplaige et Gilles Bossuet (Chrono-environnement, UFC).

De plus, certains versants présentent actuellement une dichotomie d'épaisseurs de limons qui serait due à des différences de dépôts liées à l'orientation de versant. Ce sont les versants sud qui possédent les épaisseurs plus faibles de limons, mais ce sont également les versants les plus susceptibles à avoir été cultivés. Il serait donc intéressant de réaliser des bilans d'érosions sur deux structures, chacune localisées sur un des versants, pour savoir si les différences observées ne sont pas également liées à une érosion différentielle.



Reconstitution (coupe) d'une cabane gauloise d'après les mardelles fouillées à Altrip par Colbus-Wichmann.
Paroi, en allant de l'intérieur à l'extérieur :
1. Troncs d'arbres et branches entrelacées. 2. Couche de limon ou terre glaise. 3. Couverture de roseaux.

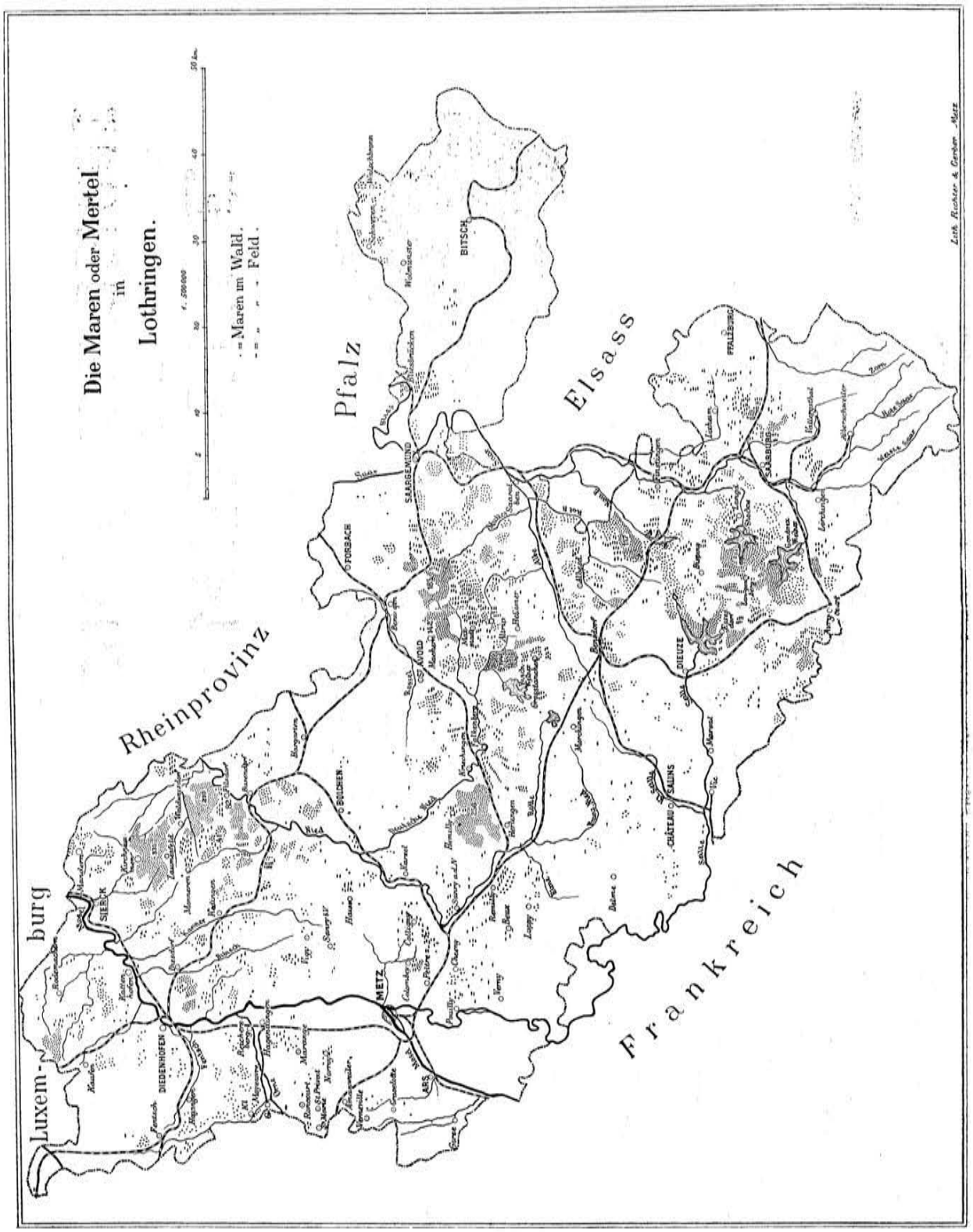
Annexe 1 - Représentation schématique d'une cabane gauloise qui selon Colbus (1905) aurait été construit dans les mardelles. Extrait de Linckenheld (1927).



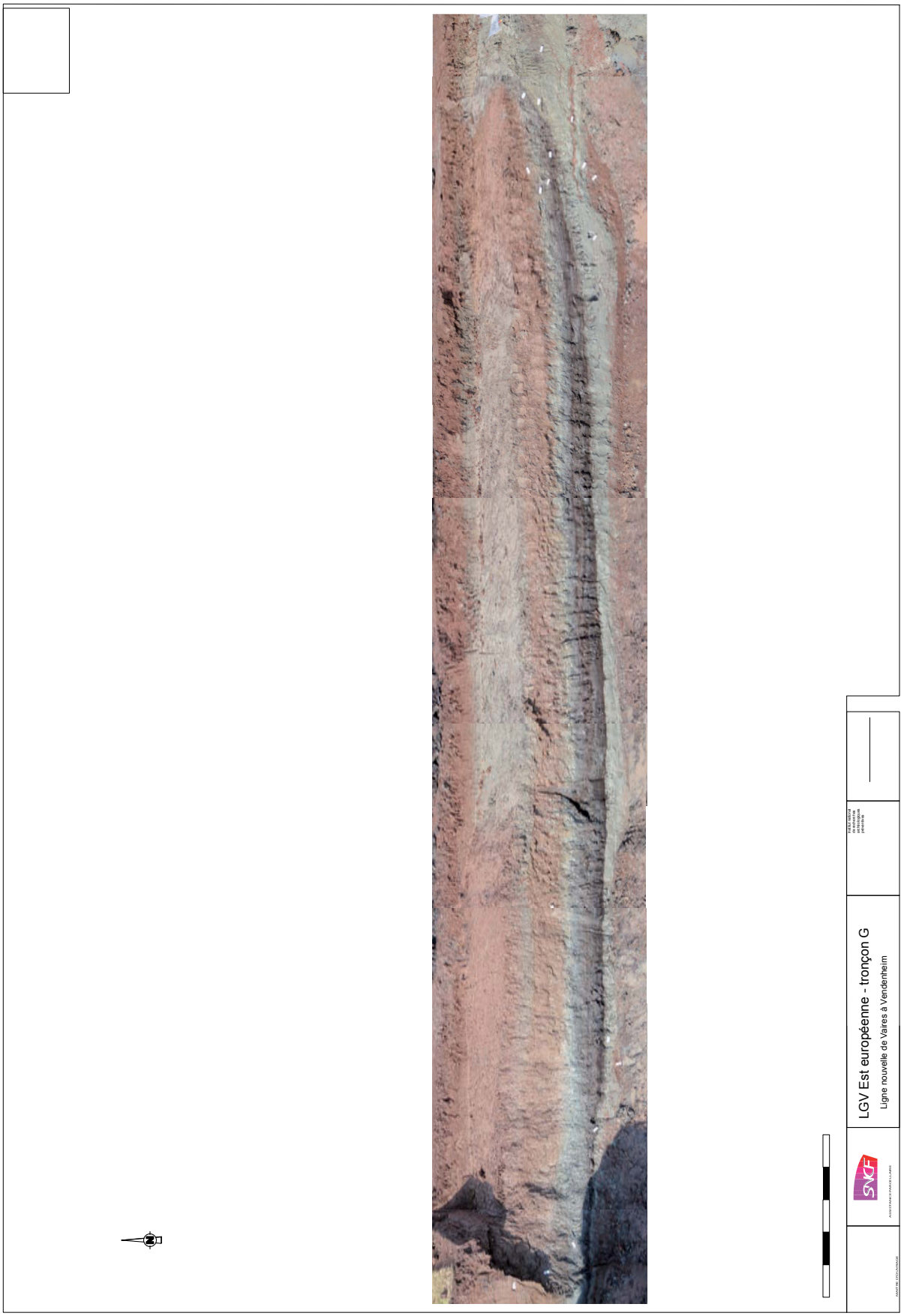
INSOLITE

Le mystère du trou de Langatte

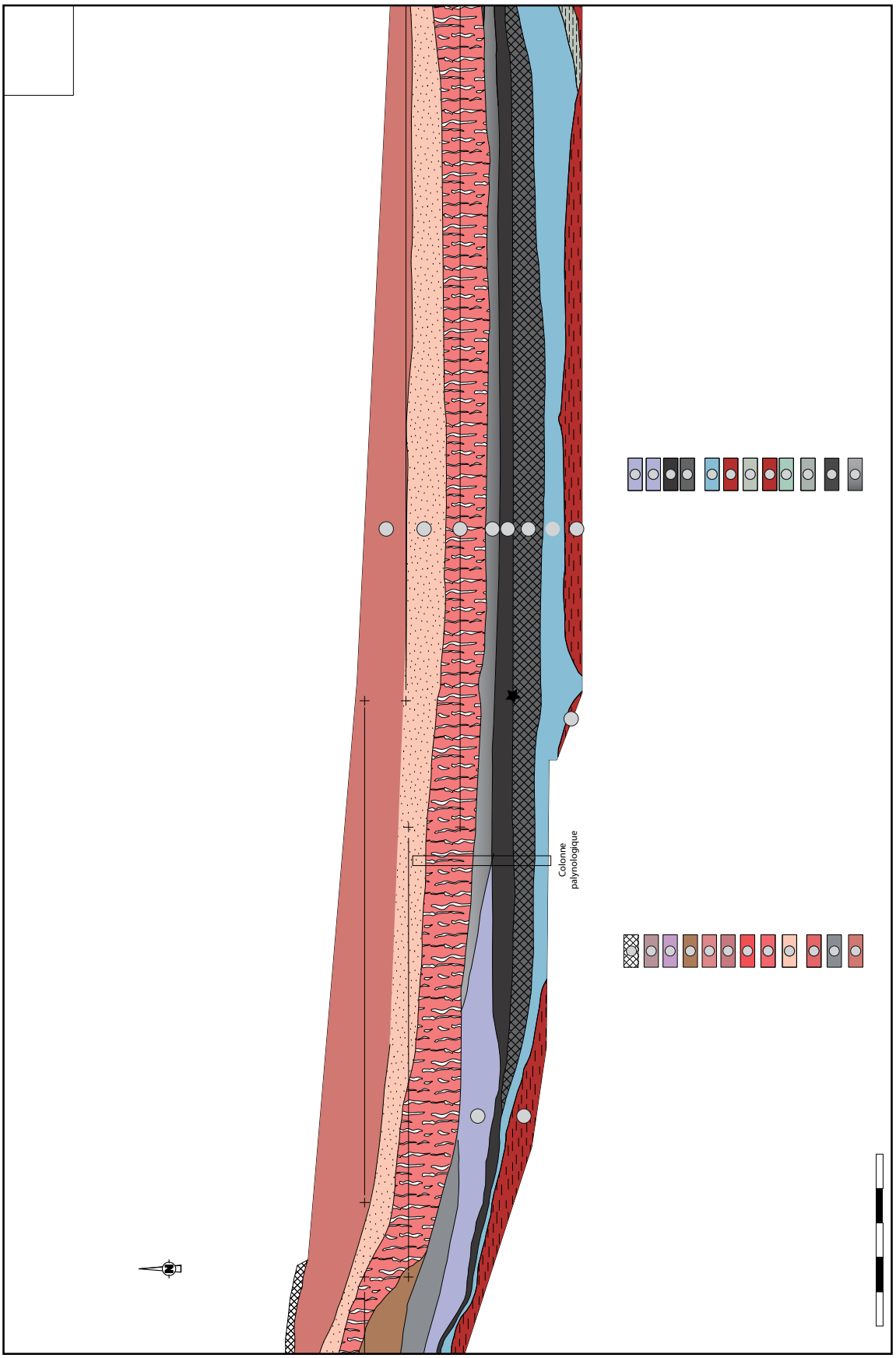
Annexe 2 - Article paru le 25 Mars 2010 dans le Républicain Lorrain, le journal distribué dans le département de la Moselle. Article transmis par Nicolas Meyer.



- Carte de Wichmann (1903) illustrant le résultat de son inventaire de 5000 structures localisées aussi bien région du Pays des étangs (Dieuze-Mittersheim), la région au sud de Saint-Avold et la région au sud de Sierck.



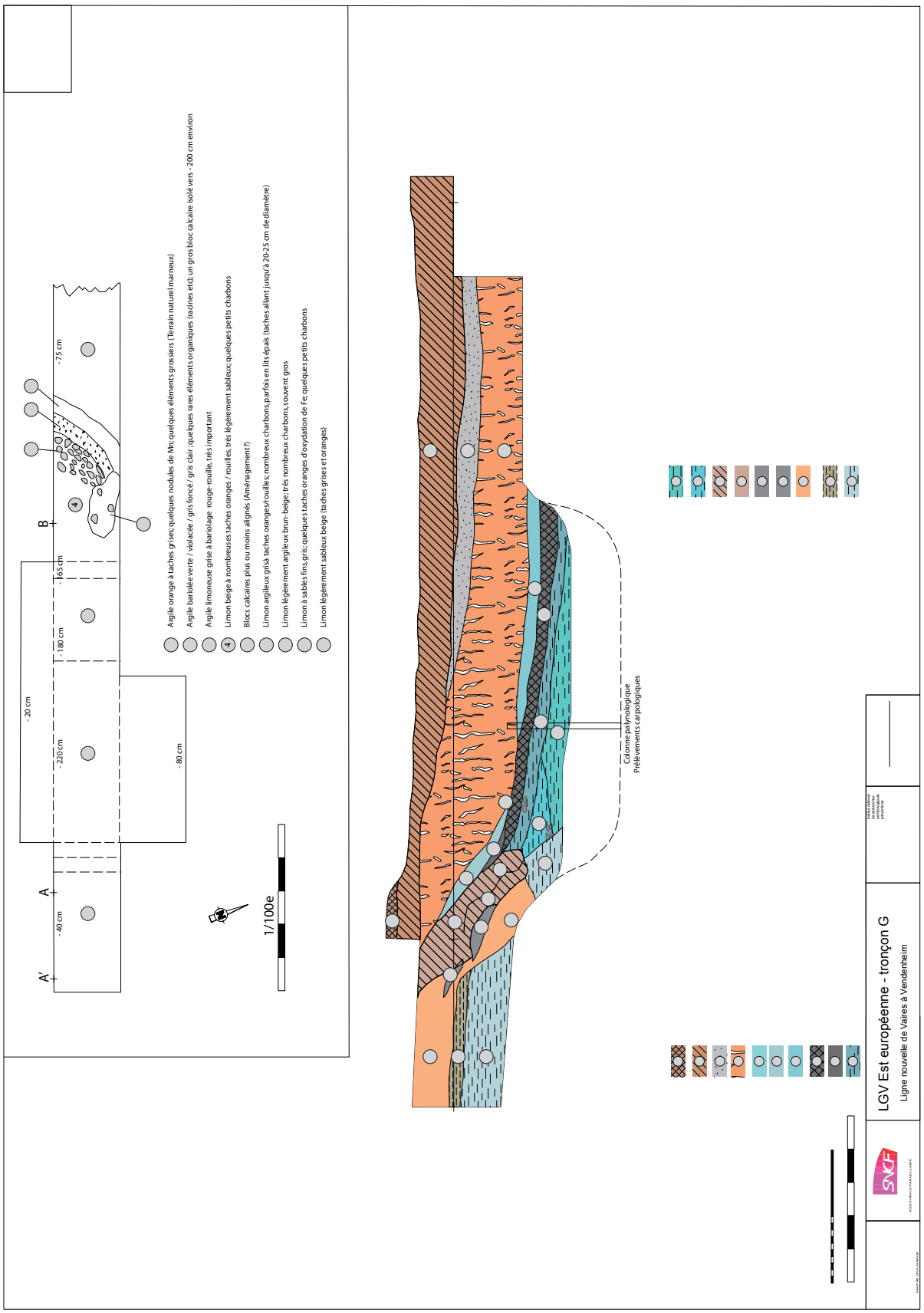
Annexe 4 - Montage photographique du remplissage sédimentaire de la mardelle de Bisping (BIS) fouillée par l'équipe de Sébastien Viller de l'INRAP de Metz au mois de juillet 2009 et disponible dans le document de synthèse (Goepp, 2010). Clichés de Stéphanie Goepp.



Annexe 5 - Représentation schématique de la coupe de la mardelle de Bisping (BIS) et description des unités stratigraphiques identifiées sur le terrain. Cette figure est disponible dans le document de synthèse des fouilles archéologiques réalisées par l'INRAP (Goepp, 2010).



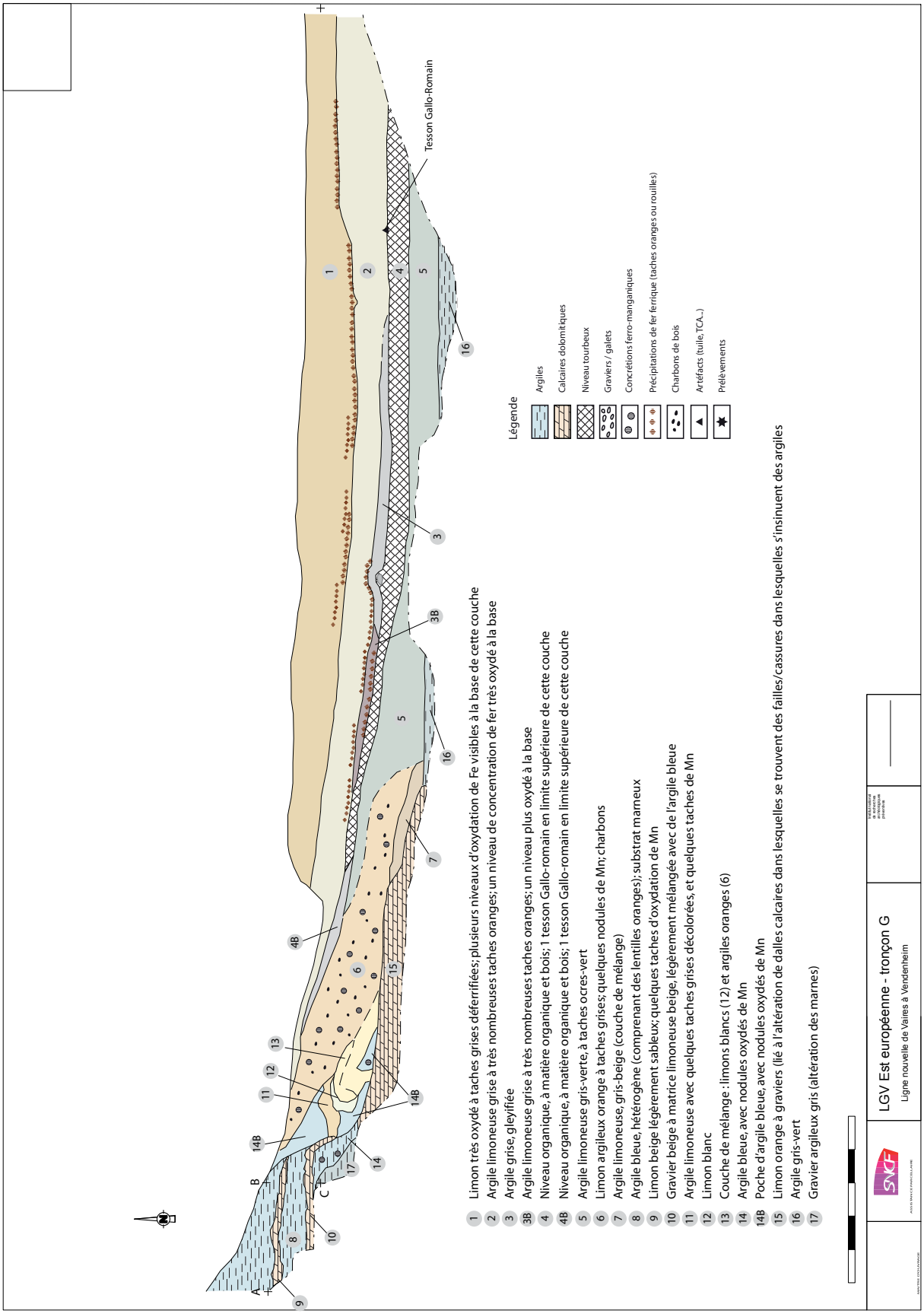
Annexe 6 - Montage photographique du remplissage sédimentaire de la mardelle de Langatte (LAN) fouillée par l'équipe de Sébastien Viller de l'INRAP de Metz au mois de juillet 2009 et disponible dans le document de synthèse (Goepp, 2010). Clichés de Stéphanie Goepp.



Annexe 7 - Représentation schématique de la coupe de la mardelle de Langatte (LAN) et description des unités stratigraphiques identifiées sur le terrain. Cette figure est disponible dans le document de synthèse des fouilles archéologiques réalisées par l'INRAP (Goepp, 2010).



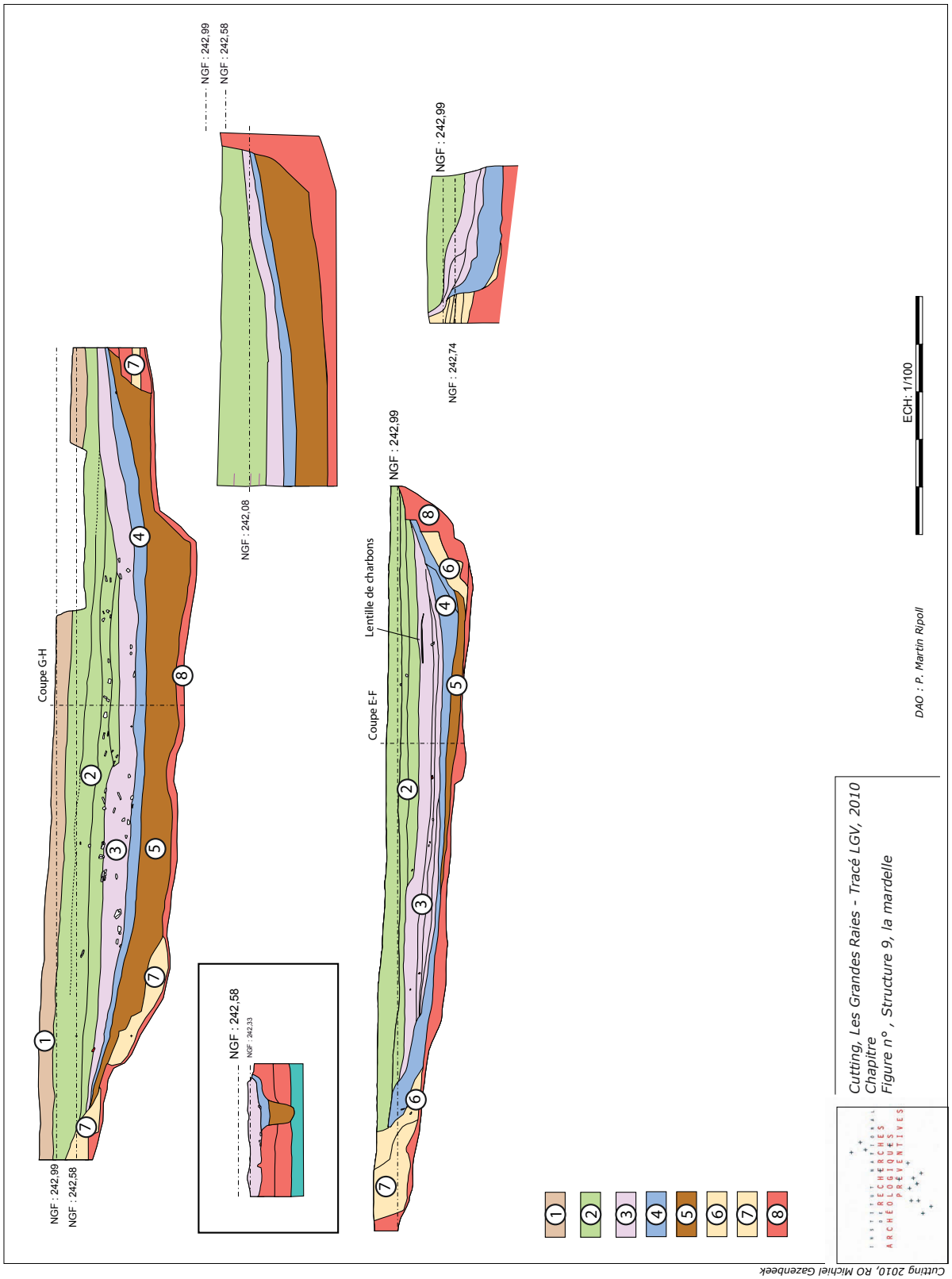
- Montage photographique du remplissage sédimentaire de la mardelle de Haut-Clocher fouillée par l'équipe de Sébastien Viller de l'INRAP de Metz au mois de juillet 2009 et disponible dans le document de synthèse (Goepp, 2010). Clichés de Stéphanie Goepp.



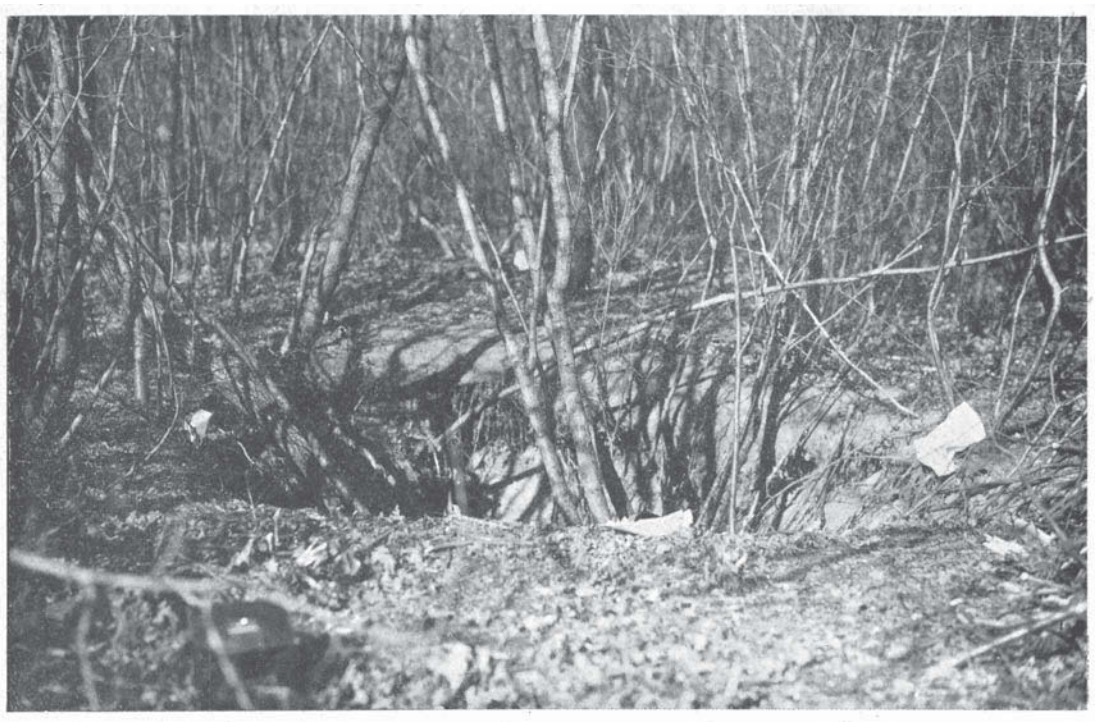
Annexe 9 - Représentation schématique de la coupe de la mardelle de Haut-Clocher et description des unités stratigraphique identifiées sur le terrain. Cette figure est disponible dans le document de synthèse des fouilles archéologique réalisées par l'INRAP (Goepp, 2010).



Annexe 10 - Photographies de la mardelle H2 fouillée par Thierry et Philippe Klag de l'INRAP de Metz en 2010. Clichés T. & P. Klag.



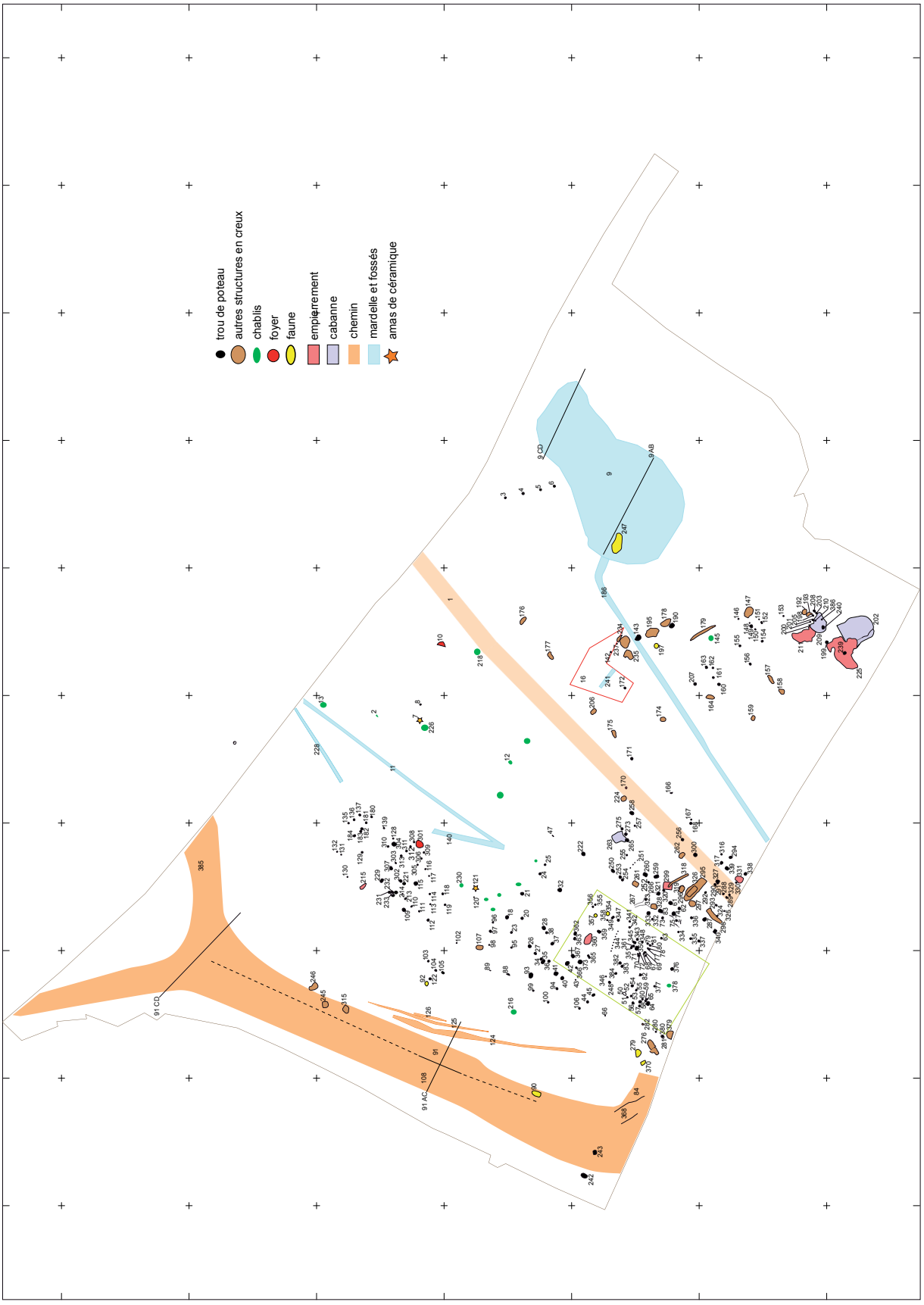
Annexe 11 - Représentation schématique des coupes réalisées sur la mardelle de Cutting (CUT) et description des unités stratigraphiques identifiées sur le terrain par l'équipe de Michel Gazenbeek (INRAP, Metz) lors des fouilles archéologiques en 2010 sur le tracé de la future ligne LGV.



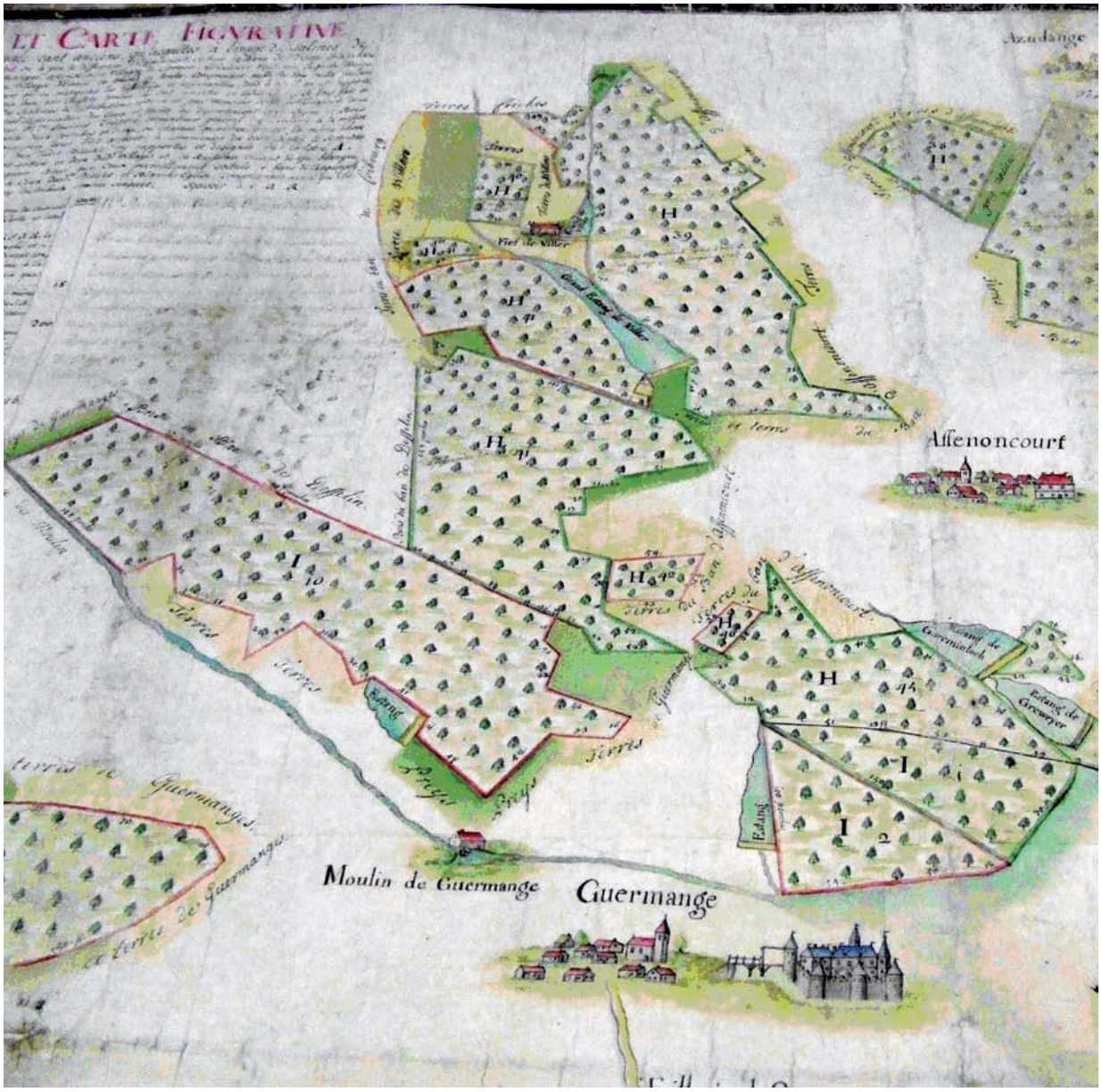
Annexe 12 - Photographie extraire de Delafosse (1948). Elle illustre, selon l'auteur, une mardelle en cours de formation dans le massif forestier de Teterchen (Saint-Avold, Moselle). Cet effondrement est localisé sur les terrains du Keuper supérieur. La structure mesurait 4,20 m de diamètre et 2 m de profondeur.



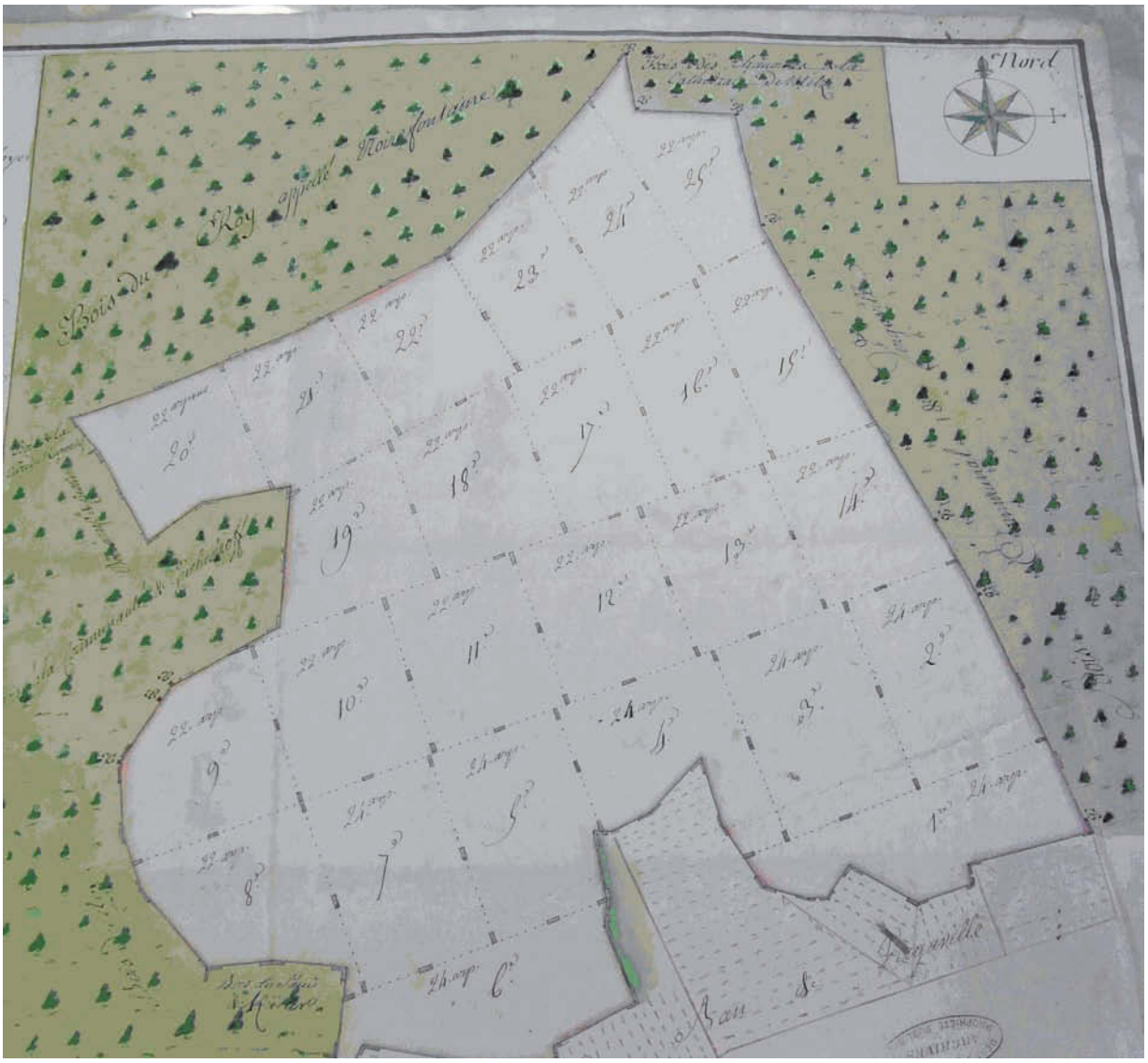
Annexe 13 - Photographie d'une dépression observée lors de prospections de terrains. Cet effondrement est localisé sur les terrains du Keuper supérieur. La structure mesure environ 4 m de diamètre et 3 m de profondeur. Cliché David Etienne.



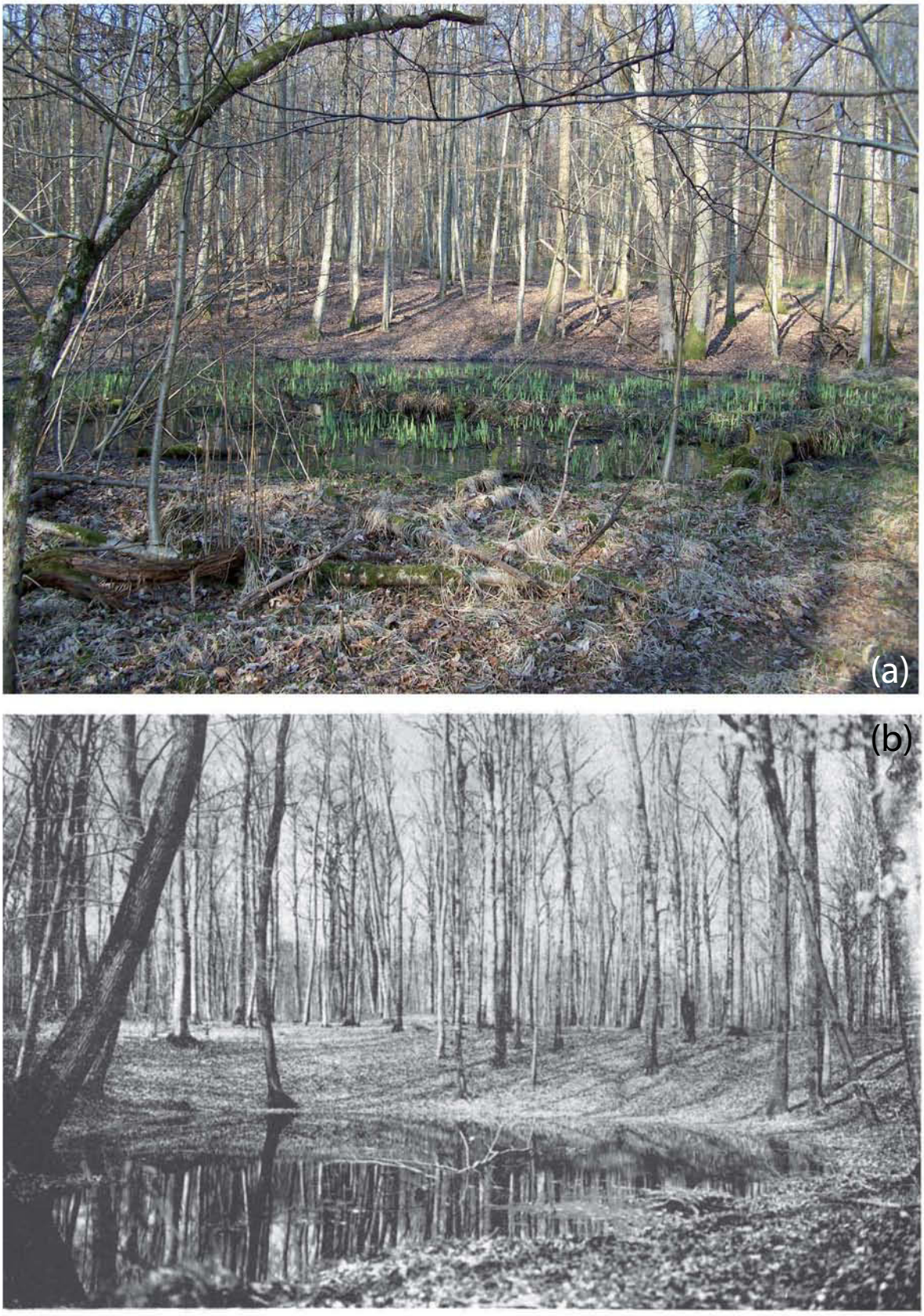
Annexe 14 - Plan de l'ensemble des structures archéologiques découvertes autour de la mardelle de Cutting (CUT) par l'équipe de Michel Gazenbeek (l'INRAP, Metz) lors des fouilles archéologiques en 2010 sur le tracé de la future ligne LGV.



Annexe 15 - Carte de 1712 représentant les communes autour de l'étang de Lindre (Moselle, France) et des bois réservés à l'utilisation des salines à cette époque dont les forêts du Römersberg, d'Assenoncourt et de Saint Jean. Données issues des recherches de Catherine Zeller dans le fond cartographique des archives départementales de Meurthe-et-Moselle.



Annexe 16 - Carte (non datée) des coupes réglées sur 25 années des bois de l'abbaye de Vergaville (Moselle, France) (en blanc) entourée par les bois du roi réservés aux salines (en vert). Données issues des recherches de Catherine Zeller dans le fond cartographique des archives départementales de Meurthe-et-Moselle.



- Photographies de deux mardelles, (a) l'une localisée dans le massif du Römersberg (Guermange, sud-Moselle) et l'autre localisée dans la forêt de Flatten (Sierck, nord-Moselle), sur lesquelles on perçoit en arrière plan (en amont) de la mardelle une ondulation topographique pouvant correspondre à un tallus de parcellaire (
).

Annexe 18 - Tableau décrivant les auteurs, le nombre de passage par mardelle, la période de relevé, le nombre de mardelles intra-forestières relevées et la méthode utilisée pour ces relevés, des inventaires floristiques utilisés dans la base de donnée de 663 relevés floristiques de mardelles crée par Lequy (2009).



- Plan du ban de Langatte en 1732 composé de 264 cantons différents tant terres que prés et jardins, y compris les 17 quartiers du village de Langatte (Moselle, France). Les mardelles localisées en milieux ouverts et en lisière forestière sont représentées sur ce plan. Données issues des recherches de Catherine Zeller dans le fond cartographique des archives départementales de Meurthe-et-Moselle.

Ackermann F., 1999. Airborne laser scanning - present status and future expectations. ISPRS *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **54** (2-3): 64-67.

Ancel M.-J., 2010. *La crémation en milieu rural en Gaule Belgique romaine - Les exemples de la Lorraine et du Nord-Pas-de-Calais*. Thèse, Université de Lyon 2, 453 p.

Andersen S.T., 1970. *The Relative Pollen Productivity and Pollen Representation of North European Trees, and Correction Factors for Tree Pollen Spectra. Determined by Surface Pollen Analyses from Forests*. In: Geological Survey of Denmarks, Serie 96: 69-92.

Andersen S.T., 1979. *Identification of wild grass and cereal pollen*. Danmarks Geologiske Undersøgelse, Årbog, 69-92.

Badré L., 1992. Les forêts et les industries en Lorraine à la fin du XVIIème siècle. *Revue Forestière Française*, **XLIV** (4) : 365-369.

Barth B., Schneider C., Schneider T., Dorda D., Eisinger D., Didion A. et Royar H., 2001. *Les mardelles en Sarre et en Lorraine*. O.N.F. (Eds), Direction Régionale de Lorraine, Nancy, 188 p.

Bégeot C., 1998. Le comportement pollinique du Noisetier (*Corylus avellana*), son rôle comme indicateur d'impacts anthropiques ? L'exemple d'un transect dans le sud du Jura. *Acta botanica Gallica*, **145** (4) : 271-277.

Bégeot C., 2000. *Histoire de la végétation et du climat au cours du Tardiglaciaire et du début de l'Holocène sur le massif jurassien central à partir de l'analyse pollinique et des macrorestes végétaux*. Thèse. Université de Franche-Comté, Besançon, 199 p.

Behre K.-E., 1981. The interpretation of anthropogenic indicators in pollen diagrams. *Pollen et Spores*, **23**: 225-245.

Behre K.-E., 1986. *Anthropogenic indicators in pollen diagrams*. Balkema (Eds), Rotterdam, 232 p.

Behre K.-E., 1988. *The role of man in European vegetation history. In* : Huntley B. & Webb T. (Eds), Vegetation History, Hanbook of Vegetation Science, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 633-672.

Bellemare J., Motzkin G. and Foster D.R., 2002. Legacies of the agricultural past in the forested present: an assessment of historical land-use effects on rich mesic forests. *Journal of Biogeography*, **29**: 1401-1420.

Berton R., 1989. *La mémoire des sols.* La Serpenoises (Eds), Presses Universitaires de Nancy, Nancy, 176 p.

Bertran P., 2004. Soil erosion in small catchments of the Quercy region (southwester France) during the Holocene. *The Holocene*, **14** (4): 597-606.

Beug H.J., 2004. *Leitfaden der Pollenbestimmung für Mitteleuropa und angrenzende Gebiet*. Pfeil, München, 542 p.

Bewley R.H., Crutchley S.P. and Shell C.A., 2005. New light on an ancient landscape: lidar survey in the Stone-henge World Heritage Site. *Antiquity*, **79**: 636-647.

Birks H.J.B., Peglar S.M. and Austin H.A., 1996. An annoted bibliography of canonical correspondence analysis and related constrained ordination methods (1986-1993). *Abstracta Botanica*, **20**: 17-36.

Blaauw M., 2010. Methods and code for 'classical' age-modelling of radiocarbon sequences. *Quaternary Geochronology*, **5** (5): 512-518.

Blouet V. et Klag T., 1987. *Autoroute Knutange Boulange - Rapport de fouille, rapport de prospection*. Rapport technique, Direction Régionale des Affaires Culturelles de Lorraine, Metz, 15 p.

Bossuet G., Ruffaldi P., Magny M., Richard H. et Mouthon J., 1996. Dynamique et approche quantitative des remplissages fini- et postwürmiens du bassin lacustre de Cerin (Jura, France). *Bulletin de la Société géologique de France*, **167** (4): 483-494.

Braque R., 1966. Observations sur les mardelles du plateau nivernais. *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire*, **8** : 167-179.

Braun-Blanquet, 1964. *Pfanzensoziologie - Grundzüge der Vegetationskunde*. Springer (Eds) troisième édition, Wien-New York, 865 p.

Brethes A., 1976. *Carte des stations de la forêt domaniale du Römersberg (Moselle).* Rapport technique de l'Institut National de la Recherche Agronomique, Nancy, 36 p.

BRGM, 2001. Carte géologique de Château-salins au 1/50 000. Editions BRGM, Orléans.

Briggs J., Spielmann K.A., Schaafsma H., Kintigh K.W., M. Kruse, Morehouse K. and Schollmeyer K., 2006. Why ecology needs archaeologists and archaeology needs ecologists. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **4** (4): 180-188.

Broström A., Gaillard M.J., Ihse M. and Odgaard B., 1998. Pollen-landscape relationships in modern analogues of ancient cultural landscapes in southern Sweden - a first step towards quantification of vegetation openness in the past. *Vegetation History and Archaeobotany*, **7**: 189-201.

Broström A., Sugita S. and Gaillard M.-J. 2004. Pollen productivity estimates for the reconstruction of past vegetation cover in the cultural landscape of southern Sweden. *The Holocene*, **14** (3): 368-381.

Broström A., Sugita S., Gaillard M.J. and Pilejso P., 2005. Estimating the spatial scale of pollen dispersal in the cultural landscape of southern Sweden. *The Holocene*, **15** (2): 252-262.

Broström A., Nielsen A.B., Gaillard M.-J., Hjelle K., Mazier F., Binney H., Bunting J., Fyfe R., Meltsov V., Poska A., Räsänen S., Soepboer W., von Stedingk H., Suutari H. and Sugita S., 2008. Pollen productivity estimates of key European plant taxa for quantitative reconstruction of past vegetation: a review. *Vegetation History and Archaeobotany*, **17** (5): 461-478.

Bunting M.J., Armitage R., Binney H.A. and Waller M. 2005. Estimates of 'relative pollen productivity' and 'relevant source area of pollen' for major tree taxa in two Norfolk (UK) woodlands. *The Holocene,* **15** (3): 459-465.

Cailleux A., 1956. Mares, mardelles et pingos. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, **242** (15) : 1912-1914.

Calcotte R., 1995. Pollen source area and pollen productivity: avidence from forest hollows. *Journal of Ecology*, **83**: 591-602.

Calcotte R., 1998. Identifying forest stand types using pollen from forest hollows. *The Holocene*, **8** (4): 423-432.

Catteau E., Duhamel F., Baliga M.F., Basso F., Bedouet F., Cornier T., Mullie B., Mora F., Toussaint B. et Valentin B., 2009. *Guide des végétations des zones humides de la région Nord-Pas de Calais.* Conservatoire botanique national de Bailleul (Eds), Bailleul, 632 p.

CEE, 1995. *Utilisation rationnelle et conservation des zones humides.* Communication de la Commission au Conseil et au Parlement Européen. CCE, COM 189 (95), 66 p.

Chen Y., 1988. Pollen source and distribution in a forest hollow in Sylvania, Michigan, U.S.A. *Pollen et Spores*, **XXX** (1): 95-110.

Cinotti B., 1996. Evolution des surfaces boisées en France : proposition de reconstitution depuis le début du XIXe siècle. *Revue Forestière Française*, **48** (6) : 547-562.

Clozier R., 1926. Travaux récents sur les limons du bassin parisien. *Annales de Géographie*, **35** (193) : 83-86.

Cluzeau C., 1996. *Typologie de la végétation des étangs de Lorraine (Plaine de la Woëvre et Pays des Etangs).* Rapport DIREN Lorraine, Université de Metz, 37 p.

Colbus E., 1905. Neue Untresuchungen von Maren und der danebenliegenden Tumuli. *Jahrbuch des Gesellshaft für Lothringische Geschichte und Altertumskunde*, **17** (2): 236-271.

Colin G. et Godard A., 1962. Les dépressions fermées en Lorraine. *Revue de Géographie de l'Est*, **2** (3) : 233-261.

Couderc J.-M., 1979. Observations sur les mardelles de Touraine. *Norois*, **101** : 29-47.

Courbouleix S. et Fleury R., 1996. Mares, mardelles et pergélisol : Exemple des dépressions circulaires de Sologne. *Association Française du Périglaciaire*, **3** : 63-69.

Coûteaux M., 1969. Formation et chronologie palynologique des tufs calcaires du Luxembourg Belgo-Grand-Ducal. *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire*, **20** : 179-206.

Crutchley S., 2006. Light detection and ranging (LiDAR) in the Witham Valley, Lincolnshire: an assessment of new remote Sensing techniques. *Archeological prospection*, **13**: 251-257.

Crutchley S., 2009. Ancient and modern: Combining different remote sensing techniques to interpret historic landscapes. *Journal of Cultural Heritage*, **10**: 65-71.

Cubizole H., Tourman A., Argant J., Porteret J., Oberlin C. and Serieyssol K., 2003. Origins of European biodiversity: palaeo-geographic signification of peat inception during the Holocene in the granitic eastern Massif Central (France). *Landscape Ecology*, **18**: 227-238.

Cugny C., Mazier F. and Galop, D., 2010. Modern and fossil non-pollen palynomorphs from the Basque mountains (western Pyrenees, France): the use of coprophilous fungi to reconstruct pastoral activity. *Vegetation History and Archeobotany.*

Cuntz O., 1929. *Itineraria Antonini Augusti et Burdigalense*. Teubner (Eds), Leipzig.

Dambrine E., Dupouey J.L., Laut L., Humbert L., Thinon M., Beaufils T. and Richard H., 2007. Present forest biodiversity patterns in France related to former Roman agriculture. *Ecology*, **88** (6): 1430-1439.

Dangien B. et Decornet J.M., 1977. Aperçu phyto-sociologique des groupements aquatiques et semi-aquatiques des mardelles du bassigny. *Documents phyto-sociologiques*, **1** : 57-70.

Davis O.K., 1987. Spores of the dung fungus Sporormiella: increased abundance in historic sediments and before Pleistocene megafauna extinction. *Quaternary research*, **28**: 290-294.

Davis O.K. and Schafer D., 2006. Sporormiella fungal spores, a palynological means of detecting herbivore density. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **237**: 40-50.

Deffontaines et Guyot, H., 1922. Les mardelles de Lorraine. *Revue anthropologique*, **11-12** : 359-362.

Degron, 1995. Historique de la forêt du Römersberg : une forêt de Lorraine sous l'emprise des salines. *Revue Forestière Française*, **47** (5) : 590-597.

Delafosse W., Guyot H. et Bellard A., 1932. La question des mardelles en Moselle. *Bulletin de la société naturelle de Moselle*, **33** : 89-102.

Delafosse W., 1948. De l'origine des Mardelles de Lorraine. *Extrait des Mémoires de l'Académie Nationale de Metz*, **11** (17) : 1-23.

Desforges A., 1908. A propos des mardelles. *Bulletin de la Société préhistorique française*, **5** (8) : 391-395.

Desjardins E. et Longnon A., 1876. Géographie historique et administrative de la Gaule romaine, quatrième tome, les sources de la topographie comparée. Hachette (Eds), Paris, .

Devereux B.J., Amable G.S., Crow P. and Cliff A.D., 2005. The potential of airborne LiDAR for detection of archeological features under woodland canopies. *Antiquity*, **79** (305): 648-660.

Devereux B.J., Amable G.S. and Crow P., 2008. Visualisation of LiDAR terrain models for archaeological feature detection. *Antiquity*, **82** (316): 470-478.

Dickson C., 1988. Distinguishing cereal from wild grass pollen: some limitations. *Circaea*, **5** (2): 67-71.

Doneus M., Briese C., Fera M. and Janner M., 2008. Archaeological prospection of forested areas using full-waveform airborne laser scanning. *Journal of Archaeological Science*, **35** (4): 882-893.

Duby G., 1954. La révolution agricole médiévale. *Revue de géographie de Lyon*, **29** (4) : 361-366.

Duchaufour P., 1983. *Pédologie - 1. Pédogenèse et classification*. Editions Masson, Paris, France, 491 p..

Dupouey J.L., Sciama D., Koerner W., Dambrine E. et Rameau J.C., 2002a. La végétation des forêts anciennes. *Revue Forestière Française*, **6** : 521-532.

Dupouey J.L., Dambrine E., Laffite J.D. and Moares C., 2002b. Irreversible impact of past land use on forest soils and biodiversity. *Ecology*, **83** (11): 2978-2984.

Dupouey J.-L., Bachacou J., Cosserat R., Aberdam S., Vallauri D., Chappart G. et Corvisier-de Villèle M.A., 2007. Vers la réalisation d'un carte géoréférencée des forêts anciennes de France. *Le monde des Cartes*, **191** : 85-98.

Duval T., 2000. *TGV Est européen - Bassin versant de la Sarre - Expertise patrimoniale - «MARES»*. ECOLOR, Fénétrange, 65p.

Ellenberg, 1988. *Vegetation Ecology of Central Europe*. Quatrième edition, Cambridge University Press (Eds), Cambridge, 731 p.

Enters D., Lücke A. and Zolitschka B., 2006. Effects od land-use change on deposition and composition of organic matter in Frickenhauser See, northern Bavaria, Germany. *The Science of the Total Environment*, **369**: 178-187.

Enters D., Dörfler W. and Zolitschka B., 2008. Historical soil erosion and land-use change during the last two millenia recorded in lake sediments of Frickenhauser See, northern Bavaria, central Germany. *The Holocene*, **18** (2): 243-254.

Etienne D., 2007. *Archives sédimentaires et palynologiques des forêts lorraines : origines et utilisations anthropiques des mardelles et impact de l'Homme sur la végétation du massif du Römersberg (Moselle, France) depuis 1500 ans*. Mémoire de Master 2, Institut National de la Recherche Agronomique, Nancy, 44 p.

Etienne D., Ruffaldi P., Ritz F. et Dambrine E., 2010. Etude des variations de la végétation d'un massif forestier de la Plaine Lorraine (Moselle, France) depuis le Moyen Age. *Quaternaire*, **21** (1) : 317-323.

Etienne D., Ruffaldi P., Goepp S., Ritz F., Georges-Leroy M., Pollier B. and Dambrine E., 2011. The origin of closed depressions in Northeastern France: A new assessment. *Geomorphology*, **126**, 121-131.

Etienne V., 1999. *Mardelles de la forêt de Parroy - Cartographie, intérêt écologique, gestion*. Document interne O.N.F., Lunéville, 10 p.

Feagri K. and Iversen J., 1989. *Textbook of Pollen Analysis*. John Wiley & Sons (Eds), Chichester-New York-Brisbane-Toronto-Singapore, 328 p.

Ferdière A., 1988. *Les campagnes en Gaule romaine (52 av. J.-C. à 486 apr. J.-C.)*. Collection des Hespérides, Errance (Eds), Paris, 302 p.

Ferdière A., 2005. *Les Gaules (Provinces des Gaules et Germanies, Provinces Alpines) : IIe siècle av.-Ve siècle ap. J.-C*. Armand Colin (Eds), Paris, 447 p.

Fichtl S., 1994. *Les Gaulois du Nord de la Gaule (150-20 av. J.-C.)*. Editions Errance, Paris, France, 190 p.

Fichtl S., 2004. *Les peuples gaulois (IIIe-Ier siècles av. J.-C.)*. Editions Errance, Paris, France, 180 p.

Flotté P. et Fuchs M., 2004. Carte archéologique de la Gaule, Moselle 57/1. Editions de la Maison des sciences de l'homme, Paris, 893 p.

Foster D., Swanson F., Aber J., Burke I., Brokaw N., Tilman D. and Knapp A., 2003. The Importance of Land-Use Legacies to Ecology and Conservation. *BioScience*, **53** (1): 77-88.

Foucault A. & Raoult J.F., 2005. *Dictionnaire de Géologie*. Editions Dunod, sixième édition, Paris, France, 382 p.

Gaillard M.-J., 1984. Etude palynologique de l'évolution Tardi- et Postglaciaire de la végétation du Moyen-Pays Romand (Suisse). *Dissertationes Botanicae*, **77**, 322 p.

Gaillard M.-J., Birks H.J.B., Emanuelsson U. and Berglund B.E., 1992. Modern polle/land-use relationships as an aid in the reconstruction of past land-uses and cultural landscapes: an example from south Sweden. *Vegetation History and Archaeobotany*, **1**: 3-17.

Gallagher J.M. and Josephs R.L., 2008. Using LiDAR to Detect Cultural Resourcesin a Forested Environment: an Example from Isle Royale National Park, Michigan, USA. *Archaeological Prospection*, **15**: 187-206.

Galop D., 1998. *La fôret, l'homme et le troupeau dans les Pyrénées. 6000 ans d'histoire de l'environnement entre Garonne et Méditerranée*. Thèse, Université du Mirail, Toulouse, 285 p.

Gauthier E., 2004. *Forêts et agriculteurs du Jura. Les quatre derniers millénaires*. Presses Universitaires de Franche-Comté (Eds), Besançon, 197 p.

Georges-Leroy M., Heckenbenner D., Laffite J.D. et Meyer N., 2007. *Les parcellaires anciens fossilisés dans les forêts lorraines*. *In*: Dupouey et al. 2007 : 121-131.

Georges-Leroy M., Bock J., Dambrine E. et Dupouey J.L., 2008. L'apport du laser scanneur à l'étude des parcellaires gallo-romains du massif forestier de Haye (Meurthe-et-Moselle). *Bulletin de la liaison AGER*, **18** : 121-131.

Georges-Leroy M., Bock J., Dambrine E. et 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) : 2-16.

GIEC, 2007. *Bilan 2007 des changements climatiques - Contribution des groupes de travail I, II et III au quatrième*. Rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Genève, 103 p.

Giguet-Corvex C., Arnaud F., Poulenard J., Disnar J.R., Delhon C., Francus P., David F., Enters D., Rey P.J. and Delannoy J.J., in press. Changes in erosion patterns during the Holocene in a currently treeless subalpine catchment inferred from lake sediment geochemistry (Lake Anterne, 2063 m a.s.l, NW French Alps): The role of climate and human activities. *The Holocene*.

Gillijns K., Poesen J. and Deckers J., 2005. On the characteristics and origin of closed depressions in loess-derived soils in Europe - a case study from central Belgium. *Catena*, **60** (1): 43-58.

Goepp S., 2010. *Etude des mardelles de deux secteurs de la LGV sur les marnes du Keuper*. Rapport de fouille, Institut National de la Recherche Archéologique, Metz, 131 p.

Goossens D., 1988. Scale model simulations on the deposition of loess in hilly terrain. *Earth Surface Processes and Lanforms*, **13**: 533-544.

Goubet F. et Meyer F., 2005. Le Fallberg, un site gallo-romain méconnu. *Cahier de la Société d'Histoire et d'Archéologie de Saverne et environs*, 212 : 1-11.

Grenier A., 1906. *Habitations gauloises et villas latines dans la cité des médiomatrices - etude sur le développpement de la civilisation Gallo-romaine dans une province gauloise*. Librairie Honoré Champion (Eds), Paris, 198 p.

Grönlund E., Simola H. and Huttunen P., 1986. Paleolimnological reflections of fiber-plant retting in the sediment of a small clear-water lake. *Hydrobiologia*, **143**: 425-431.

Guckert A., Girard A. et Jacquin G., 1970. Note sur les sols du Plateau lorrain liasique. *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude des Sols*, **2** : 29-51.

Halsall G., 1995. *Settlement and social organization, the Merovingian region of Metz*. Cambridge University Press (Eds), Cambridge, 307 p.

Härbele D., 1938. Zur Kenntnis der Maren (Mardelle, Pfühle) Südwestdeutschlands und Lothringens. *Geographische Zeitschrift*, **34** : 260-270.

Harris J.A., Hobbs R.J., Higgs E. and Aronson J., 2006. Ecological Restoration and Global Climate Change. *Restoration Ecology*, **14** (2): 170-176.

Heegaard E., Birks H.J.B. and Telford R.J., 2005. Relationship between calibrated ages and depth in stratigraphic sequences: an estimation procedure by mixed-effect regression. *The Holocene*, **15** (4): 612-618.

Heckenbenner D. et Meyer N., 2004. *Les habitats et les parcellaires du piémont vosgien*. *In* : Flotté et Fuchs (2004), 177-179.

Heim J., 1970. *Les relations entre les spectres polliniques récents et la végétation actuelle en Europe Occidentale*. Thèse, Université de Louvain, Louvain, 179 p.

Heim J. and Mullenders W., 1973. Relative pollen rain around cultivated fields. *Acta Botanica Fennica*, **102**: 1-26.

Heitz-Weniger A., 1977. Zur Waldgeschichte im unteren Zürichseegebiet während des Neolothikums un der Bronzezeit Ergebnisse pollen analytischer Untersuchungen. *Bauhina*, **6** (1) : 61-81.

Henning J., McCormick M. and Fischer T., 2010. *Decem Pagi at the end of antiquity and the fate of the Roman road system in eastern Gaul*. *In*: Bidwell P. (Eds), Poceedings of the XXIst International Limes (Roman Frontiers) Congress 2009, Oxford, 1-9.

Herault B. and Thoen D., 2008. Diversity of plant assemblages in isolated depressional wetlands from Central-Western Europe. *Biodiversity & Conservation*, **17** (9): 2169-2183.

Herault B. and Thoen D., 2009. How habitat area, local and regional factors shape plant assemblages in isolated closed depressions. *Acta Oecologica*, **35**: 385-392.

Hermy M., Honnay O., Firbank L., Grashof-Bokdam C. and Lawesson J.E., 1999. An ecological comparison between ancient and other forest plant species of Europe and the implications for forest conservation. *Biological Conservation*, **91**: 9-22.

Hjelle K.-L., 1998. Herb pollen representation in surface moss samples from mown meadows and pastures in Western Norway. *Vegetation History and Archaeobotany*, **7** (2): 79-96.

Hill M.O., Mountford J.O., Roy D.B. and Bunce R.G.H., 1999. *Ellenberg's Indicator Values for British Plants - Technical Annex*. Institute of Terrestrial Ecology, Huntingdon, 46 p.

Houben P., 2008. Scale linkage and contingency effects of field-scale and hillslope-scale controls of long-term soil erosion: Anthropogeomorphic sediment flux in agricultural loess watersheds of Southern Germany. *Geomorphology*, **101**: 172-191.

Hueck K., 1931. *Erläuterung zur Vegetationskundlichen Karte des Endmoränengebiets von Chorin (Uckermark). In*: Breiträge zur Naturdenkmalpflege, Neudmann (Eds), Berlin, 134-214 p.

Innes J.B. and Blackford J.J., 2003. The ecology of Late Mesolithic woodland disturbances: model testing with fungal spore assemblage data. *Journal of Archaeological Science*, **30**: 185-194.

Jackson S.T., 1990. Pollen source area and representation in small lakes of Northeastern United States. *Review of Palaeobotany and Palynology*, **63**: 53-76.

Jackson S.T. and Hobbs R.J., 2009. Ecological Restoration in the Light of Ecological History. *Science*, **325**: 567-568.

Jaillet S., 2005. *Le Barrois et son karst couvert - Géomorphologie : relief, processus, environnement*. Karstologia Mémoires (Eds), n° 12, 336 p.

Jamagne M. & Mathieu C., 1971. Contribution à l'étude stratigraphique des loess dans le nord-est du Bassin de Paris. *Bulletin de l'Association française pour l'étude du quaternaire*, **8** (4) : 209-233.

Jamagne M., 1973. *Contribution à l'étude pédogénétique des formations loessiques du nord de la France*. Thèse, Faculté universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux, 455 p.

Jenness J., 2006. *Topographic Position Index (tpi_jen.avx) extension for ArcView 3.x, v. 1.3a*. *In*: J. Enterprises (Editor).

Joinville O. de, Saur S., Bretar F., 2003. Le levé laser aéroporté : techniques, applications et recherche. *Bulletin d'information scientifique et technique de l'IGN*, **74** (3) : 37-52.

Jouffroy-Bapicot I., 2010. *Evolution de la végétation du massif du Morvan (Bourgogne- France) depuis la dernière glaciation à partir de l'analyse pollinique - Variations climatiques et impact des activités anthropiques*. Thèse, Université de Franche-Comté, 373 p.

Julve, 1993. *Synopsis phytosociologique de la France (communautés de plantes vasculaires).* Lejeunia (Eds), Liège, 1-160 p.

Julve, 1997. *Flore et végétation du P.N.R. de la Haute Vallée de Chevreuse (Yvelines). Inventaire floristique et phytosociologique et évaluation patrimoniale botanique du territoire du Parc*. Document du Parc naturel régional de la Haute vallée de Chevreuse, 119 p.

Jussy, J.H., Koerner E., Dambrine E., Dupouey J.L. and Benoît M., 2002. Influence of former agricultural land use on net nitrate production in forest soils. *European Journal of Soil Science*, **53**: 367-374.

Kennett J.D., Ingram B.L., Southon J.R. and Wise K., 2002. Differences in 14C age between stratigraphically associated charcoal and marine shell from the archaic period site of kilometer 4, Southern Peru: ol wood or old water?. *Radiocarbon*, **44** (1): 53-58.

Kerig T. and Lechterbeck J., 2004. Laminated sediments, human impact, and a multivariate approach: a case study in linking palynology and archaeology (Steisslingen, Soutwest Germany). *Quaternary International*, **113**: 19-39.

Koch W., 1926. *Die Vegetationseinheiten der Linthebene unter Berücksichtigung der Verhältnisse in der Nordostschweiz*. *In*: Systematisch-kristische Studie Separatabdruck aus dem 61 (II) des Jahrbuches der St.Gallischen Naturwissenschaftlichen Gesellschaft, St Gallen, 144 p.

Koerner W., Dupouey J.L., Dambrine E. and Benoît M., 1997. Influence of past land use on the vegetation et soil of present day forest in the Vosges mountains, France. *Journal of Ecology*, **85**: 351-358.

Koerner W., Cinotti B., Jussy J.H. et Benoît M., 2000. Evolution des surfaces boisées en France depuis le début du XIXe siècle : Identification et localisation des boisements des territoires agricoles abandonnés. *Revue Forestière Française*, **52** (3): 249-270.

Laffite D., 2004. *Occupation du sol et structures agraires à l'époque antique sur le Plateau lorrain entre la Seille et la Nied française*. *In* : Flotté et Fuchs, 2004. Carte archéologique de la Gaule (Moselle 57/1), Paris.

Lambinon J., Delvosalle L. et Duvigneaud J., 2004. *Nouvelle flore de la Belgique, du Grand-Duché de Luxembourg, du Nord de la France et des régions voisines (Ptéridophytes et Spermatophytes)*. 5ème édition, Patrimoine du Jardin botanique national de Belgique, Meise, 1167 p.

Lawrence C.B. and Goodman D., 1997. *Ground-Penetrating Radar - An Introduction for Archaeologists*. Altamira Press (Eds), Walnut Creek-London-New Delhi, 232 p.

Le Bissonais Y., Thorette J., Bardet C. et Daroussin J., 2002. *L'érosion hydrique des sols en France*. Rapport INRA-IFEN, Orléans, 106 p.

Le Tacon F., 1966. *Contribution à l'étude des sols d'un massif forestier des Basses Vosges*. Thèse, Université de Nancy, 121 p.

Lebart L., Piron M. et Morineau A., 2006. *Statistique exploratoire multidimensionnelle*. Editions Dunod, Prais, 480 p.

Lechterbeck J., Kalis A.J. and Meurers-Balke J., 2009. Evaluation of prehistoric land use intensity in the Rhenish Loessboerde by canonical correspondence analysis-A contribution to LUCIFS. *Geomorphology*, **108** : 138-144.

Leclerc G., 2005. *Les mardelles du sita Natura 2000, Forêts et étangs de Parroy, vallée de la Vezouze et fort de Manonviller*. Rapport de stage de BTS agricole, Lunéville, 40 p.

Lemée G., 1937. *Recherches écologiques sur la végétation du Perche*. Thèse, Université de Paris, Nemours, 386 p.

Lequy E., 2009. *Elaboration d'une typologie des mardelles de Lorraine et réalisation d'un guide de gestion de ces milieux - Typologie et guide de gestion des mardelles*. Mémoire de Master 2, Institut National de la Recherche Agronomique, Nancy, 55 p.

Leroyer C., 1997. *Homme, Climat, Vegetation au Tardi- et Postglaciaire dans le Bassin Parisien-Apports de l'étude palynologique des fonds de vallée*. Thèse, Université de Paris I, 574 p.

Linckenheld E., 1927. Les mardelles de Lorraine. *Bulletin de l'association philomatique d'Alsace et de Lorraine*, **7** (3) : 169-177.

Lotter A.F., 1999. Late-glacial and Holocene vegetation history and dynamics as shown by pollen and plant macrofossil analyses in annually laminated sediments from Soppensee, central Switzerland. *Vegetation History and Archaeobotany*, **8**: 165-184.

Lutz M., 1971. Le domaine gallo-romain de saint-Ulrich (Moselle). *Gallia*, **XXIX** : 17-44.

Lutz, M., 1972. Le domaine gallo-romain de saint-Ulrich (Moselle). *Gallia*, **XXX** : 41-82.

Magny M., Peyron O., Gauthier E., Vannière B., Millet L. and Vermot-Desroches B., 2011. Quantitative estimates of temperature and precipitation changes over the last millenium from pollen and lake-level data at Lake Joux, Swiss Jura Mountains. *Quaternary Research*, **75** (1): 45-54.

Manneville O., VergneV., Villepoux O., Blanchard F., Bremer K., Dupieux N., Feldmeyer-Christe E., Francez A.-J., Hervio J.-M., Julve P., Laplace-Dolonde A., Paelinckx D. et Schumacker R., 1999. *Le monde des tourbières et des marais - France, Suisse, Belgique et Luxembourg*. Editions Delachaux et Niestlé, Lausanne, 320 p.

Mather A.S., Needle C.L. and Fairbairn J., 1998. The human drivers of global land cover change: the case of forests. *Hydrological Processes*, **12**: 1983–1994.

Mathis D., 2010. *Géohistoire agraire d'un pays lorrain : le Saulnois*. Thèse, Université Nancy II, Nancy, 967 p.

Maud'Heux M., 1861. Mares, maies ou mortes. *Annales de la société d'emulation des Vosges*, **10** (3) : 173-189.

Maussion, 2004. Le rôle des limons dans l'implantation antique en Champagne berrichone (Indre et Cher) - L'apport d'une approche par un SIG. *Histoire & mesure*, **XIX** (3-4) : 399-420.

Mazier F., 2006. *Modélisation de la relation entre pluie pollinique actuelle, végétation et pratiques pastorales en moyenne montagne (Pyrénées et Jura)*. Thèse, Univeristé de Franche-Comté, Besançon, 229 p.

Mercuri A.M., Accorsi C.A. and Mazzanti M.B., 2002. The long history of *Cannabis* and its cultivation by the Romans in central Italy, shown by pollen records from Lago Albano and Lago di Nemi. *Vegetation History and Archaeobotany*, **11**: 263-276.

Mériaux J.L., Schumacker R., Tombal P. et De Zuttere P., 1980. *Contribution à l'étude des boulaies à sphaignes dans le Nord de la France, l'Ile de France et les Ardennes. In*: La végétation des sols tourbeux, Colloques de Phytosociologie, Lille, 477-494.

Mighall T.M., Abrahams P.W., Grattan J.P., Hayes D., Timberlake S. and Forsyth S., 2002. Geochemical evidence for atmospheric pollution derived from prehistoric copper mining at Copa Hill (Cwmystwyth, mid-Wales, UK). *Science of the Total Environment,* **292**: 69-80.

Mighall T.M., Martínez Cortizas A., Biester H. and Turner S.E., 2006. Proxy climate and vegetation changes during the last five millennia in NW Iberia: Pollen and non-pollen palynomorph data from two ombrotrophic peat bogs in the North Western Iberian Peninsula. *Review of Palaeobotany and Palynology*, **141**: 203-223.

Millarakis P., 2001. Typologie et gestion des mardelles forestières de la Woëvre (Meuse). *Revue Forestière Française*, **51** : 343-345.

Millet L., Arnaud F., Heiri O., Magny M., Verneaux V. and Desmet M., 2009. Late-Holocene temperature recosntruction from chironomid assemblages of Lake Anterne, northern French Alps. *The Holocene*, **19** (2): 317-328.

Miras Y., 2004. *L'analyse pollinique du plateau de Millevaches (Massif Central, France) et de sites périphériques limousins et auvergnats : approches des paléoenvironnemets, des systèmes agro-pastoraux et évolution des territoires ruraux*. Thèse, Université de Franche-Comté, Besançon, 300 p.

Moore P.D., Webb J.A. and Collinson M.E., 1991. *Pollen Analysis*. Blackwell Science (Eds), Oxford-London-Edinburgh-Malden-Victoria-Paris, 216 p.

Noirfalise A. et Sougnez N., 1961. Les Forêts riveraines de Belgique. *Extrait du Bulletin du Jardin Botanique de l'Etat*, Bruxelles, **XXX** : 199-288.

Norton L.D., 1986. Erosion-sedimentation in a closed drainage basin in Northwest Indiana. *Soil Science Society of America Journal*, **50**: 209-213.

Olivier L. and Kovacik J., 2006. The Briquetage de la Seille (Lorraine, France): Proto-industrial Salt Production in the European Iron Age. *Antiquity*, **80** (109): 558-566.

Parshall T. and Calcote R., 2001. Effect of pollen from regional vegetation on stand-scale forest reconstruction. *The Holocene*, **11**: 81-87.

Passarge H., 1985. Phanerophyten-Vegetation der Markischen Oderaue. *Phytocoenologia*, **13** (4): 505-603.

Peterken G.F. and Game M., 1984. Historical factors affecting the number and distribution of vascular plants species in Central Lincolnshire. *Journal of Ecology*, **72**: 155-182.

Petit P., 1994. *Histoire générale de l'Empire romain, 1. Le Haut-Empire (27 avant J.-C. - 161 après J.-C.).* Editions Seuil, Paris, 307 p.

Pissart A., 1956. L'origine périglaciaire des viviers des Hautes Fagnes. *Annales de la Société géologique de Belgique*, **79**: 119-131.

Pissart A., 1958. Les dépressions fermées de la région parisienne. Les difficultés d'admettre une origine anthropique. *Revue de géomorphologie dynamique*, **9** (5-6): 73-83.

Pissart A., 2003. The remnants of Younger Dryas lithalsas on the Hautes Fagnes Plateau in Belgium and elsewhere in the world. *Geomorphology*, **52** (1-2): 5-38.

Planchais N., 1966. Analyses polliniques en forêt de Premery (Nièvre). *Bulletin de l'Association Française pour l'étude du Quaternaire*, **3** : 180-190.

Poulsen, 1997. Agricultural technology in Medieval Denmark. *In:* Astill, G. and Langdon, J. (Eds), Medieval farming and technology. *The impact of agricultural change in Northwest Europe*. Leiden, Brill, 115-145.

Prentice I.C., 1985. Pollen Representation, Source Area, and Basin Size: Toward a Unified Theory of Pollen Analysis. *Quaternary Research*, **23**: 76-86.

Puertas O., 1999. Premiers indices polliniques de néolithisation dans la plaine littorale de Montpellier (Hérault, France). *Bulletin de la Société Préhistorique Française*, **96** (1) : 15-20.

Puget J.-L, Blanchet R., Salençon J. et Carpentier A., 2010. *Le changement Climatique*. Rapport de l'Académie des sciences (Institut de France), 26 octobre 2010, 21 p.

Querrien A., Moulin J. and Tabbagh A., in press. Confrontation of geophysical survey, soil studies and excavation data to evidence soil loss.

R development Team, 2009. *R: A language and environment for statistical computing.* R Fondation for Statistical Computing, Vienna, Austria. [http://www.R-project.org]

Ramm C., 1999. *Inventaire et prospection de gestion des mardelles en forêt domaniale d'Albestroff et Fénétrange, et en forêt communale de Belles-Forêts*. Rapport de stage de BTS agricole, Office Nationale des Forêts, Sarrebourg, 26 p.

Rapper D. and Bush M., 2009. A test of Sporormiella representation as a predictor of megaherbivore presence and abundance. *Quaternary Research*, **71** (3): 490-496.

Räsänen S., Hicks S. and Odgaard B., 2004. Pollen deposition in mosses and in a modified 'Tauber trap' from Hailuoto, Finland: what exactly do the mosses record?. *Review of Palaeobotany and Palynology*, **129** (1-2): 103-116.

Rasmussen, 2009. Mid-to late-Holocene land-use change and lake development at Dallund S0, Denmark: vegetation and land-use history inferred from pollen data. *The Holocene*, **15** (8): 1116-1129.

Reille M., 1992-1998. *Pollen et spores d'Europe et d'Afrique du Nord*. Laboratoire de Botanique historique et Palynologie (Eds), Université d'Aix-Marseille III, 535 p.

Reimer P.J., Baillie M.G.L., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Blackwell P.G., Bronk-Ramsey C., Buck C.E., Burr G.S., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hajdas I., Heaston T.J., Hogg A.G., Hughen K.A., Kaiser K.F., Kromer B., McCormac F.G., Manning S.W., Reimer R.W., Richards D.A., Southon J.R., Talamo S., Turney C.S.M., Van der Plicht J. and Weyhenmeyer C.E., 2009. IntCal09 and Marine09 radiocarbon age calibration curves, 0–50,000 years cal BP. *Radiocarbon*, **51** (4): 1111-1150.

RFF, 2008. Rapport de la campagne de reconnaissance des sols pour la LGV Est - documentation interne. Rapport technique, Paris.

Richard H., 1994. Evaluation de l'impact de l'homme sur la végétation : l'apport de la palynologie. *Hitoire & Mesure*, **9** (3-4) : 305-316.

Richard H., 2004. *Néolithisation précoce, Premières traces d'anthropisation du couvert végétales à partir des données polliniques*. Collection Annales Littéraires (Eds), Presses Universitaires de Frache-Comté, Besançon, 217 p.

Riera S., Lopez-Saez J.A. and Julia R., 2006. Lake responses to historical land use changes in northern Spain: The contribution of non-pollen palynomorphs in a multiproxy study. *Review of Palaeobotany and Palynology*, **141**: 127-137.

Rius D., Vannière B. and Galop D., 2009. Fire frequency and landscape management in the north-western Pyrenean piedmont, France, since the early Neolithic (8000 cal. BP). *The Holocene*, **19** (6): 847-859.

Risbøl O., Gjerten A.K. and Skare P., 2006. Airborne laser scanning of cultural remains in forests: some preliminary results from Norwegian project. *In*: Campana S., Forte M., *From Space to Place. Second International Conference on Remote Sensing in Archaology. Proceedings of the second Internation Workshop*, CNR, Rome, 107-112.

Rousseau P., 1990. L'évolution des forêts françaises métropolitaines d'après les statistiques forestières. *Revue Forestière Française*, **52** (1) : 56-65.

Rozensweig M.L., 1995. *Species diversity in space and time*. Cambridge University Press, Cambridge, 436 p.

Ruffaldi P., 1993. *Histoire de la végétation du Jura méridional depuis le retrait glacier würmien à partir des analyses palynologiques du lac Cerin (Ain, France)*. Thèse, Université de Franche-Comté, Besançon, 254 p.

Ruffaldi P., 1999. Premières traces polliniques de néolithisation des zones de basse altitude de Lorraine (France). *Quaternaire*, **10** (4): 263-270.

Ruffaldi P., Ritz F., Richard H., Dambrine E. et Dupouey J.-L., 2007. *Analyse pollinique de la mardelle d'Assenoncourt (Moselle, France) : impact des pratiques agricoles sur la biodiversité végétale en milieu forestier. In*: J.L. Dupouey, E. Dambrine, C. Dardignac et M. Georges-Leroy (Eds), La mémoire des forêts. Actes du colloque "Forêt, archéologie et environnement" 14-16 décembre 2004. ONF-INRA-DRAC, Nancy : 69-77.

Saint Ferjeux P., 1847. Notice sur les voies romaines, les camps romains et les mardelles du département de la Haute-Marne. *Mémoires de la Société Historique et Archéologique de Langres*, **1** : 293-329.

Sajaloli B., 2007. Les mares une histoire sans paroles. In: *Stratégie territoriale de préservation des mares de la France métropolitaine (version au 29.05.2007).* Fédération des Parcs Naturels Régionaux de France, Maison de l'Environnement de Seine et Marne, Pôle-Relais Mares & Moullières de France, 110 p.

Schoffield J.E. and Waller M.P., 2005. A pollen analytical record for hemp retting from Dungeness Foreland, UK. *Journal of Archaeological Science*, **32**: 715-726.

Schumacher E. et Van Werveke L., 1908. *Mittheilungen des Geologischen Landesanstalt von Elsass-Lothringen*. Satrassburger Druckerei und Verlagsanstalt (Eds), Strasbourg, 627 p.

Scollar I., Tabbagh A., Hess A. and Herzog I., 1990. *Topic In Remote Sensing - Archaeological Prospecting and Remote Sensing*. Cambridge University Press (Eds), Cambridge-New York-Port Chester-Melbourne-Sydney, 674 p.

Sittler B., 2004. *Revealing historical landscapes by using airborne laser scanning - A 3D modell of ridge and furrow in forest near Rastatt (Germany). In*: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVI: 258-261.

Slotboom R.T., 1963. Comparative geomorphological and palynological investogations of the Pingos (Viviers) in The Hautes-Fagnes (Belgium) and the Mardellen in the Gutland (Luxemburg). *Zeitschrift für Geomorphologie*, **7** (3): 193-231.

Soepboer W., Sugita S., Lotter A.F., Van Leeuwen J.F.N. and Van der Knaap W.O., 2007. Pollen productivity estimates for quantitative of vegetation cover on the Swiss Plateau. *The Holocene*, **17** (1) : 65-77.

Soepboer W., Sugita S. and Lotter A.F., 2009. Regional vegetation-cover changes on the Swiss Plateau during the past two millennia: A pollen-based reconstruction using the REVEALS model. *Quaternary Science Reviews*, **29** (3-4): 472-483.

Stobbe A., 1996. *Die holozäne Vegetationsgeschichte der nördlichen Wetterau - paläoökologische Untersuchungen unter besonderer Berücksichtigung anthropogener Einflüsse*. Thèse. Johan Wolfgang Goethe Universität, Franckfurt am Main, 216 p.

Stockmarr J., 1971. Tablets with spores used in absolute pollen analysis. *Pollen et spores*, **13**: 615-621.

Sugita S., 1994. Pollen representation of vegetation in Quaternary sediments: theory and method in patchy vegetation. *Journal of Ecology*, **82**: 881-897.

Sugita S., Gaillard M.J. and Broström A., 1999. Landscape openess and pollen records: a simulation approach. *The Holocene*, **9** (4): 409-421.

Swetnam T.W., Allen C.D. and Betancourt J.L., 1999. Applied historical ecology: Using the past to manage for the future. *Ecological Applications*, **9** (4): 1189-1206.

Tauber H., 1965. *Differential pollen dispersion and interpretation of pollen diagrams. With a contribution to the interpretation of the elm fall*. Geological Survey of Denmark, second series, 7-69.

Thoen D., 1997. Observations floristiques dans les mardelles du Gutland (Luxembourg). *Bulletin de la Société des Naturalistes du Luxembourg*, **98** : 41-48.

Thoen D. et Hérault B., 2006. Flore, groupes socio-écologiques et typologie des mardelles forestières de Lorraine belge et luxembourgeoise. *Bulletin de la Société des naturalistes luxembourgeois*, **107** : 3-25.

Tiner R.W., 2003. Geographically isolated wetlands of the United States. *Wetlands*, **23**: 494-516.

Tinner W., Lotter A.F., Ammann B., Conedera M., Hubschmid P., van Leeuwen F.N. and Wehrli M., 2003. Climatic change and contemporaneous land-use phases north and south of the Alps. *Quaternary Science Reviews*, **22**: 1447-1460.

Van Geel B., 2002. *Non-pollen palynomorphs*. *In*: J.P. Smol, J.B. Birks and W.M. Last (Editors), Tracking environmental change using lake sediments. Volume 3: Terrestrial, algal, and siliceous indicators. Developments in Paleoenvironmental Research. Kluwer, Dorderecht, 99-119.

Van Geel B., Buurman J., Brinkkemper O., Schelvis J., Aptroot A., van Reenen G. and Hakbijl T., 2003. Environmental reconstruction of a Roman Period settlement site in Uitgeest (The Netherelands), with special reference to coprophilous fungi. *Journal of Archaeological Science*, **30**: 873-883.

Van Geel B., Zazula G.D. and Schweger C.E., 2007. Spores of coprophilous fungi from under the Dawson tephra (25,300 14C yeras BP), Yukon Territory, northwestern Canada. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, **252**: 481-485.

Vannière, 2001. *Feu, agro-pastoralisme et dynamiques environnementales en France durant l'Holocène. Analyse du signal incendie, approches sédimentologiques et étude de cas en Berry, Pyrénées et Franche-Comté*. Thèse, Institut National Agronomique de Grignon, Paris, 329 p.

Vanwalleghem T., Bork H.R., Poesen J., Dotterweich M., Schmidtchen G., Deckers J., Scheers S. and Martens M., 2006a. Prehistoric and Roman gullying in the European loess belt: a case study from central Belgium. *The Holocene*, **16** (3): 393-401.

Vanwalleghem T., Poesen J., Vitse I., Bork H.R., Dotterweich M., Schmidtchen G., Deckers J., Lang A. and Mautz B., 2006b. Origin and evolution of closed depressions in central Belgium, European loess belt. *Earth Surface Processes and Landforms*, **32**: 574-586.

Vanwalleghem T., Van Den Eeckhaut M., Poesen J., Govers G. and Deckers J., 2008. Spatial analysis of factors controlling the presence of closed depressions and gullies under forest: Application of rare event logistic regression. *Geomorphology*, **95**: 504-517.

Viller S. et Dohr M., 2008. *Conthil, Le Gueren, site 10 - Diagnostic archéologique de la L.G.V. Est, deuxième tranche, seconde phase*. Rapport INRAP Grand Est Nord, Metz.

Viller S., 2009. *Haut Clocher, Esterbach, site 22 - Diagnostic archéologique de la L.G.V. Est, deuxièmes tranche, seconde phase*. Rapport INRAP Grand Est Nord, Metz, 52 p.

Welter T., 1923. Les mardelles de Lorraine. *Les Cahiers Lorrains*, **2** (6).

Wichmann D., 1903. Über die Maren oder Mertel in Lothringen (mit einem Bericht über die Ausgrabungen des Herrn Colbus in Altrip). *Jahrbuch des Gesellchaft für Lothringische Geschichte une Altertumskunde*, **15** : 218-262.

Willis K.J. and Birks H.J.B., 2006. What is Natural? The Need for a Long-Term Perspective in Biodiversity Conservation. *Science*, **314**, 1261-1265.

Wingert J., 1996. *Le fer dans la région de Sarrebourg.* Société d'Histoire et d'Archéologie de Lorraine (Eds), Sarrebourg, 1-52.

Zeller C., 2011. *Les mardelles - Etudes des sources historiques dans la région de la zone des étangs de Lindre et de Mittersheim (57).* Document de sythèse, Institut National de la Recherche Agronomique, Nancy, 14 p.

Au sein des anciennes chênaies-charmaies-hêtraies du Plateau lorrain, il existe des milliers de dépressions humides fermées, appelées mardelles. La question de leur origine (naturelle ou anthropique) est débattue depuis plus de 150 ans, mais aucune étude scientifique intégrée ne leur avait encore été consacrée. Des prospections LiDAR, dans la région de Dieuze-Sarrebourg (Moselle), révèlent un réseau dense de mardelles, de dimensions semblables, régulièrement espacées et fréquemment encloses dans un parcellaire agricole fossile. Des sondages géologiques et des fouilles de mardelles démontrent que leur répartition n'est pas liée à la présence de matériaux solubles dans le sous-sol ou à des effondrements karstiques, leurs remplissages sédimentaires scellant le substrat marno-calcaire en place. Les analyses polliniques et les datations radiocarbone démontrent qu'elles se sont formées dans un paysage ouvert et très anthropisé au cours du second âge du Fer ou du Haut-Empire corroborant un creusement par l'homme, pour une raison encore hypothétique, mais certainement lié à la mise en valeur agricole de ces espaces.
Les analyses palynologiques démontrent de profonds changements d'usages de ces paysages principalement par des pratiques agro-pastorale à l'époque gallo-romaine, puis agricole à la période médiévale et enfin forestière durant la période moderne. Ces dépressions humides sont aujourd'hui colonisées par des aulnaies marécageuses ou des tourbières à sphaignes. Les analyses polliniques identifient les différentes phases de leur comblement et la végétation associée ayant colonisé ces mares depuis leur création.
Ainsi, la biodiversité floristique actuelle associée à ces mardelles résulte de leur création par l'homme au cours de l'antiquité, ainsi que de l'impact des nombreux changements des pratiques pastorale, agraire et sylvicole sur les sols environnants depuis deux millénaires.

Mots-clés
Mardelle, Plateau lorrain, palynologie, LiDAR, biodiversité, Antiquité

Within the ancient oak-hornbeam-beech forests of the Plateau Lorrain, there are thousands of closed wet depressions called Mardelles. The question of their origin (natural or anthropogenic) has been debated for over 150 years, but they have not been the focus of any integrated study yet.
LiDAR surveys in the region Dieuze-Sarrebourg (Moselle), reveal a dense network of Mardelles, of similar size, spaced regularly and frequently enclosed in a fossil agricultural cadastre. Geological surveys and excavations of Mardelles show that their distribution is not related to the presence of soluble materials (salt, gypsum) in the basement or karst collapses, their sedimentary infilling sealing the marl-limestone substrate in place. The pollen analysis and radiocarbon dating shows that they were formed in an open landscape in the second Iron Age or Roman Period corroborating they were dug by man, for reasons as yet hypothetical, but certainly related the agricultural development of these areas.
The pollen analysis shows significant changes of uses of these landscapes, with mainly pastures in the Gallo-Roman time, agriculture in the medieval period and forestry during the modern period. These wet depressions are now colonized by alder swamps or peat bogs. The pollen analyses identify the different phases of filling and associated vegetation that colonized these ponds since their inception.
Thus, the present floristic biodiversity associated with these Mardelles result from their creation by man in antiquity, and the impact of the many changes that occurred in the surrounding landscape in the last two millennia.

Keywords
Closed depression, palynology, LiDAR, biodiversity, Antiquity