THÈSE
Pour obtenir le grade de Docteur

Délivré par

UNIVERSITÉ MONTPELLIER 3 – PAUL-VALÉRY

Préparée au sein de l'école doctorale

ED 60 : TERRITOIRES, TEMPS, SOCIÉTÉS ET DÉVELOPPEMENT

Et de l'unité de recherche

LABORATOIRE DE GÉOGRAPHIE ET D'AMÉNAGEMENT DE MONTPELLIER

Spécialité :

GÉOGRAPHIE ET AMÉNAGEMENT DE L'ESPACE

(Catégorie CNU n°23)

Présentée par **Thomas CANDELA**

Optimisations cartographiques pour la gestion des crises et des risques majeurs : le cas de la cartographie rapide des dommages *post*-catastrophes

Soutenue le 6 décembre 2021 devant le jury composé de :

Mme Christine ZANIN, Maître de conférences HDR, Géographe, Université Paris	Rapporteure
M. Johnny DOUVINET, Professeur des Universités, Géographe, Avignon Université	Rapporteur
Mme Paule-Annick DAVOINE, Professeure des Universités, Géographe-géomaticienne, Université Grenoble Alpes	Examinatrice
Mme Stéphanie DEFOSSEZ, Maître de conférences, Géographe, Université Paul-Valéry Montpellier 3	Examinatrice
M. Frédéric LEONE, Professeur des Universités, Géographe, Université Paul-Valéry Montpellier 3	Directeur de thèse
M. Matthieu PEROCHE, Maître de conférences, Géographe, Université Paul-Valéry Montpellier 3	Co-directeur de thèse

Hors jury :

Mme Hélène DE BOISSEZON, Ingénieure d'études, Direction de l'Innovation, des Applications et de la Science au CNES, Toulouse	Experte invitée
M. Hoilid LAMSSALAK, Directeur du bureau d'études RisCrises, Alès	Expert invité

THÈSE

Pour obtenir le grade de

Docteur

Délivré par

UNIVERSITÉ MONTPELLIER 3 – PAUL-VALÉRY

Préparée au sein de l'école doctorale

ED 60 : TERRITOIRES, TEMPS, SOCIÉTÉS ET DÉVELOPPEMENT

Et de l'unité de recherche

LABORATOIRE DE GÉOGRAPHIE ET D'AMÉNAGEMENT DE MONTPELLIER

Spécialité :

GÉOGRAPHIE ET AMÉNAGEMENT DE L'ESPACE

(Catégorie CNU n°23)

Présentée par **Thomas CANDELA**

Optimisations cartographiques pour la gestion des crises et des risques majeurs : le cas de la cartographie rapide des dommages *post*-catastrophes

Soutenue le 6 décembre 2021 devant le jury composé de :

Mme Christine ZANIN, Maître de conférences HDR, Géographe, Université Paris	Rapporteure
M. Johnny DOUVINET, Professeur des Universités, Géographe, Avignon Université	Rapporteur
Mme Paule-Annick DAVOINE, Professeure des Universités, Géographe-géomaticienne, Université Grenoble Alpes	Examinatrice
Mme Stéphanie DEFOSSEZ, Maître de conférences, Géographe, Université Paul-Valéry Montpellier 3	Examinatrice
M. Frédéric LEONE, Professeur des Universités, Géographe, Université Paul-Valéry Montpellier 3	Directeur de thèse
M. Matthieu PEROCHE, Maître de conférences, Géographe, Université Paul-Valéry Montpellier 3	Co-directeur de thèse

Hors jury :

Mme Hélène DE BOISSEZON, Ingénieure d'études, Direction de l'Innovation, des Applications et de la Science au CNES, Toulouse	Experte invitée
M. Hoilid LAMSSALAK, Directeur du bureau d'études RisCrises, Alès	Expert invité

Résumé

Optimisations cartographiques pour la gestion des crises et des risques majeurs : le cas de la cartographie rapide des dommages post-catastrophes

L'augmentation de l'impact des catastrophes s'accompagne d'une nécessité croissante d'intégrer des supports de gestion de risques et de crises efficaces. Parmi ces supports, les cartes de dommages post-catastrophes jouent depuis quelques années un rôle de plus en plus important dans les processus décisionnels. Produites par des services de cartographies rapides, dans le cadre de programmes internationaux et régionaux, ces cartes fournissent un inventaire des dommages à partir de l'imagerie satellitaire, très peu de temps après la survenue de l'événement. Malgré leur grande utilité opérationnelle, ces productions montrent une forte hétérogénéité des représentations cartographiques utilisées. Des cas concrets appliqués au séisme de Haïti en 2010, ou plus récemment le cyclone Irma en 2017, interrogent les effets d'une telle diversité cartographique sur la transmission et l'interprétation des informations par différents utilisateurs. Notre recherche a permis d'identifier les caractéristiques de ces cartes de dommages et a permis d'expérimenter les conséquences de cette diversité visuelle. Cette phase conduit à l'élaboration d'une nouvelle représentation cartographique fondée sur les préceptes de sémiologie graphique et de cartographie, adaptée à une large gamme d'utilisations, à plusieurs échelles et pour plusieurs acteurs de la gestion des risques et des crises. Les capacités visuelles et cognitives de cette nouvelle représentation ont été analysées et comparées au moyen d'un échantillon représentatif de méthodes d'agrégation employées dans la cartographie *post*-catastrophe. Les résultats ont été exploités au moyen de deux cartographies web valorisées dans plusieurs projets du laboratoire LAGAM et du bureau d'études RisCrises. Elles offrent de nombreuses possibilités de développement cartographique au service de la planification des risques et des crises, mais aussi de l'information préventive des populations. Cette thèse a également permis d'identifier les paramètres à l'origine des incertitudes (attributaires et interprétatives) des données diffusées par ces cartes, et d'en proposer une représentation visuelle.

Mots-clés : cartographie rapide *post*-catastrophe, risques, crises, sémiologie graphique, multi-échelle, SIG, cartographie web, incertitude.

***

Summary

Mapping optimizations for major risk and crisis management : the case of rapid post-disasters damage mapping

With the increase in the impact of disasters comes a growing need to integrate effective risk and crisis management supports. Among these tools, *post*-disaster damage maps have played an increasingly important role in decision-making processes in recent years. Produced by rapid mapping services, within the framework of international and regional programmes, these maps provide an inventory of damage based on satellite imagery, very shortly after the event has occurred. Despite their great operational utility, these productions show a strong heterogeneity of the cartographic representations used. Concrete cases applied to the Haiti earthquake in 2010, or more recently to hurricane Irma in 2017, question the effects of such cartographic diversity on the transmission and interpretation of information by different users. Our research identified the characteristics of these damage maps and experimented with the consequences of this visual diversity. This phase leads to the development of a new cartographic representation based on the precepts of graphic semiology and cartography, adapted to a wide range of uses, at several scales and for several actors in risk and crisis management. The visual and cognitive capabilities of this new representation were analysed and compared using a representative sample of aggregation methods used in *post*-disaster mapping. The results have been exploited by means of two web mappings that are used in several projects of the LAGAM laboratory and the RisCrises consultancy. They offer numerous possibilities for cartographic development in the service of risk and crisis planning, but also for preventive information of populations. This thesis has also identified the parameters at the origin of the uncertainties (attributive and interpretative) of the data disseminated by these maps, and to propose a visual representation of them.

Keywords: rapid *post*-disaster mapping, risks, crises, graphic semiology, multi-scale, GIS, web mapping, uncertainty.

Remerciements

À l'heure de finaliser mon mémoire, je souhaite ici remercier vivement toutes les personnes qui ont motivé, inspiré, recadré et fait épanouir ce travail de thèse.

Tout d'abord, je tiens à remercier mon directeur de thèse **Frédéric Leone** ainsi que mon co-directeur de thèse **Matthieu Péroche** pour toute la confiance, la patience et le soutien qu'ils m'ont accordé depuis le début de cette thèse. Merci de m'avoir laissé explorer le sujet à mon rythme et d'avoir su me donner le tempo pendant la rédaction. Je les remercie également de m'avoir donné la chance de participer à plusieurs missions de recherche, plus enrichissantes les unes que les autres. Leur présence à mes côtés a été une véritable source d'inspiration et de motivation. J'espère sincèrement que ce travail n'est que le début d'une longue série de recherches communes.

Je tiens à remercier chaleureusement **Hoilid Lamssalak** de m'avoir accueilli au sein de RisCrises, d'avoir cru en moi et de me donner l'opportunité de réaliser cette thèse CIFRE dans les meilleures conditions. Ta générosité et ta grande compréhension ont été essentielles pour mener à bien cette recherche.

J'adresse mes sincères remerciements aux rapporteurs de cette recherche, **Christine Tobelem Zanin** et **Johnny Douvinet** ainsi que les membres du jury, **Stéphanie Defossez**, **Paule-Annick Davoine** et **Hoilid Lamssalak** pour le temps qu'ils ont consacré à l'évaluation de ce travail.

Cette recherche est le fruit de nombreuses collaborations et d'échanges avec plusieurs personnes pour qui je souhaite adresser toute ma gratitude.

À **Hélène de Boissezon**, ingénieure d'études au CNES, qui a été l'une des premières personnes à avoir manifesté de l'intérêt pour mes travaux de recherche. Elle m'a donné l'occasion de rencontrer, discuter et collaborer avec de nombreux acteurs du spatial, et n'a pas hésité à apporter son soutien lors de mon expérimentation au colloque Géorisques de 2020.

À **Mathilde Caspard**, ingénieure au SERTIT, et **Sébastien Delbour**, Chef de l'unité des services de cartographie rapide au SIRS, d'avoir collaborer à la réalisation de mon expérimentation au colloque Géorisques de 2020 et de pérenniser nos échanges autour de la cartographie d'urgence.

À **Arnaud Sallaberry** et **Nancy Rodriguez**, Maîtres de Conférences à l'université de Paul-Valéry et chercheurs au LIRMM, pour leur si précieuse contribution à la réalisation de mon expérimentation visant à tester les capacités visuelles des représentations cartographiques. Ils m'ont également permis d'avoir accès à du matériel de suivi oculométrique essentiel pour la réalisation de cette expérimentation.

À **Christian Lavergne**, Professeur à l'université de Paul-Valéry, pour avoir offert son aide dans le traitement statistique des résultats issus de l'expérimentation menée avec les membres du LIRMM.

À **Jean Raphaël Gros-Desormeaux**, directeur adjoint du LC2S, pour m'avoir aiguillé sur mes stratégies d'échantillonnage cartographique.

À **Adrien Mangiavillano**, responsable de la filière Aéronautique, Risques et Sécurité civile pour Nîmes Métropole, de nous avoir assisté dans la réalisation du colloque Géorisques 2020 et permis de le réaliser dans l'enceinte de la base de sécurité civile de Saint-Gilles.

Aux **étudiants du Master 1 & 2 GCRN** et à **l'ensemble des participants** du colloque Géorisques 2020 pour leur participation à mes expérimentations.

Je tiens à remercier les membres de **l'équipe RETEX** du projet ANR TIREX avec qui j'ai pu expérimenter les conséquences d'une catastrophe et suivre le relèvement d'un territoire. Ils ont inspiré une grande partie de mes travaux de recherche. Merci également à **l'équipe de Météo-France** (Martinique) qui m'a accueilli et avec laquelle j'ai eu l'opportunité de collaborer dans le domaine de la géovisualisation. Affaire à suivre.

Cette thèse ne serait rien sans les personnes qui l'ont soutenu au quotidien. Je tiens donc à adresser mes plus sincères remerciements à toutes mes collègues qui ont créé un cadre scientifique et professionnel stimulant et passionnant, au sein duquel j'ai eu et j'aurai toujours plaisir à travailler. Je remercie en particulier :

Mes collègues au sein de RisCrises pour leur compréhension et leur motivation durant la dernière ligne droite. Je tiens à remercier plus particulièrement **Corentin Rodrigues** et **Martin Robustelli** pour leur soutien et leur appui sans faille dans l'accomplissement et la valorisation de mes travaux de recherche.

Mes collègues du LAGAM, pour leur accueil durant toute cette période. Un grand merci à **Monique Gherardi**, **Freddy Vinet, Stéphanie Defossez**, **Émilie Lagahe**, **Tony Rey** et **Jean-Philippe Cherel** pour leur soutien indéfectible et toute la chaleur humaine qu'ils m'ont apporté. Vos connaissances et vos retours d'expériences, abordés durant nos longues discussions, ont fait grandir cette thèse.

Au sein de ces « deux familles », j'ai bénéficié d'un cadre exceptionnel et leur amitié a été un réel réconfort et une source de motivation.

À l'ensemble des doctorants LAGAM avec qui j'ai pu nouer des relations amicales et qui ont été une force de conseil. J'adresse une pensée à **Samuel Battut,** tous mes vœux de courage pour la suite de sa thèse.

Pour finir, je souhaite exprimer mes plus sincères remerciements à ma famille et à mes amis pour avoir fait preuve d'une incroyable patience durant ces deux dernières années. La thèse est un exercice qui peut se révéler difficile pour le doctorant, mais aussi pour ses proches. Et cela l'est d'autant plus lors d'une pandémie. Malgré mes longues absences, mes silences et mes sautes d'humeur, ils ont toujours su me redonner du baume au cœur. Hélas, je ne peux pas tous vous citer, mais je ne manquerai pas de vous remercier de vive voix. Je tiens plus particulièrement à remercier mon père et ma mère, **Fernando et Josseline**, ainsi que ma compagne, **Abigaïl**, pour tout l'amour que vous m'avez apporté. Votre affection et votre soutien moral m'ont permis d'avancer sereinement et m'ont donné beaucoup de courage. Je ne vous en remercierai jamais assez. Merci à ma chienne, **Téa**, pour les bêtises, les balades et les jeux qui m'ont permis d'évacuer mon stress.

Table des matières

RESUME 1

SUMMARY 1

REMERCIEMENTS 2

TABLE DES MATIERES 4

LISTES DES ABREVIATIONS 8

PRESENTATION DES STRUCTURES D'ACCUEIL (LAGAM ET RISCRISES) 9

INTRODUCTION GENERALE 10

PARTIE 1 : CARTOGRAPHIE ET SEMIOLOGIE GRAPHIQUE AU SEIN DE LA GESTION DES RISQUES MAJEURS ET DES CRISES 18

CHAPITRE 1 : GENESE CARTOGRAPHIQUE ET EVOLUTION, DE L'ABSTRACTION A LA PRISE DE DECISION 20

1.1. LA CARTOGRAPHIE, UNE ABSTRACTION DES REALITES GEOGRAPHIQUES 20

1.1.1. Genèse de la cartographie : représenter l'espace connu 20

1.1.2. La cartographie : de l'usage fonctionnel aux approches scientifiques 21

1.1.3. Carte topographique, carte thématique : typologie de la carte 22

1.2. PRINCIPES ET USAGES DE LA CARTOGRAPHIE AU SEIN DES PROCESSUS DECISIONNELS 25

1.2.1. Théorie de la décision et de l'aide à la décision 25

1.2.2. Les Systèmes d'Aide à la Décision 26

1.2.3. L'usage de la carte dans l'aide à la décision spatiale 26

CHAPITRE 2 : LA CARTOGRAPHIE COMME OUTIL DE GESTION DES RISQUES MAJEURS ET DES CRISES 27

2.1. CONCEPTS CLES A LA GESTION DES RISQUES MAJEURS ET DES CRISES 27

2.1.1. Notion de risque et d'espace à risque 27

2.1.2. Notion de risque majeur et d'espace à risque majeur 28

2.1.3. La crise dans la gestion des risques naturels 31

2.2. DES CARTES POUR GERER LES RISQUES AVANT, ET LES CRISES PENDANT ET APRES 34

2.2.1. Les grandes familles d'usages de la carte dans la gestion des risques et des crises 34

2.2.2. Évaluer et modéliser les risques 38

2.2.3. Reconstituer et alimenter les retours d'expérience 39

2.2.4. Contrôler et réglementer l'occupation du sol 40

2.2.5. Informer et sensibiliser les populations 41

2.2.6. Anticiper et planifier les actions 43

CHAPITRE 3 : LA CARTOGRAPHIE DES DOMMAGES POST-CATASTROPHES 47

3.1. ORIGINE DE LA CARTOGRAPHIE DES DOMMAGES POST-CATASTROPHES 47

3.1.1. Mise en place d'une réponse internationale aux catastrophes 47

3.2. DU SPATIAL A LA CONSTRUCTION D'UNE INFORMATION GEOGRAPHIQUE 51

3.2.1. L'acquisition et le traitement des données satellitaires 51

3.2.2. Critères d'évaluation des dommages 54

3.3. PREMIERES PROBLEMATIQUES RENCONTREES 56

3.3.1. L'incertitude liée aux méthodes d'acquisition 56

3.3.2. L'incertitude liée à la diversité des modes de représentation 61

CHAPITRE 4 : L'APPORT DES MODELES CARTOGRAPHIQUES ET DE LA SEMIOLOGIE GRAPHIQUE POUR L'OPTIMISATION DES CARTES UTILES A LA GESTION DE CRISE **65**
4.1. CADRE THEORIQUE DE LA COMMUNICATION CARTOGRAPHIQUE 65
4.1.1. Le rôle de la perception visuelle et de la cognition dans la lecture d'une carte 65
4.1.2. Le modèle de la communication cartographique 68
4.1.3. La sémiologie graphique en cartographie 70
4.2. DE LA COMMUNICATION CARTOGRAPHIQUE A LA VISUALISATION CARTOGRAPHIQUE 76
4.2.1. La visualisation cartographique, pour l'exploration de l'information géographique 76
4.2.2. Le continuum de la visualisation cartographique et de la communication 77
4.2.3. Au-delà de la sémiologie de Bertin : les méthodes, les techniques et les outils d'aujourd'hui 78
4.3. APPLICATION AU CADRE DE LA COMMUNICATION OPERATIONNELLE EN GESTION DE CRISE 82
4.3.1. L'implication de la recherche à des fins d'optimisation et d'intégration 82
4.3.2. La cartographie des dommages post-catastrophes comme outil de communication opérationnelle 84
CONCLUSION INTERMEDIAIRE **88**

PARTIE 2 : LES CARTES DE DOMMAGES : ÉTUDE DES STYLES CARTOGRAPHIQUES ET CONSÉQUENCES DE LA DIVERSITÉ DES MODES DE REPRÉSENTATION **90**
CHAPITRE 5 : DEFINITION D'UN STYLE CARTOGRAPHIQUE DE LA CARTE DE DOMMAGES POST-CATASTROPHES **92**
5.1. CONCEPTS CLES POUR L'INTERPRETATION D'UNE FAMILLE CARTOGRAPHIQUE 92
5.1.1. Signature visuelle et saillances graphiques 92
5.1.2. Famille cartographique 98
5.2. EXTRACTION DE SIGNES GRAHIQUES D'UN ECHANTILLON DE CARTES DES DOMMAGES POST-CATASTROPHES 98
5.2.1. Analyse des signatures visuelles à partir de l'observation cartographique 98
5.2.2. Approche générale pour l'étude des cartes de dommages post-catastrophes 100
5.2.3. Construction d'une grille d'analyse cartographique 100
5.2.4. Sélection d'un échantillon cartographique 105
5.3. CARACTERISATION DES CARTES DES DOMMAGES POST-CATASTROPHES 106
5.3.1. Principaux résultats de l'échantillonnage cartographique 106
5.3.2. Résultats détaillés pour l'affichage des dommages 112
5.3.3. Résultats détaillés pour les données de second plan et les fonds de carte 121
5.4. SYNTHESE DES CONNAISSANCES ACQUISES 125
CHAPITRE 6 : EXPERIMENTATION #1, IMPLICATION DE LA DIVERSITE DES REPRESENTATIONS SUR L'INTERPRETATION UTILISATEUR (LE CAS DU SEISME DE HAÏTI DE 2010) **127**
6.1. DEFINIR LES CAPACITES PERCEPTUELLES DE REPRESENTATIONS STANDARDS PREEXISTANTES PAR UN GROUPE D'UTILISATEURS HOMOGENE 127
6.1.1. Le séisme de Haïti (2010) comme marqueur d'une « catastrophe cartographique » 127
6.1.2. Protocole de l'expérimentation #1 130
6.1.3. Traitement et exploitation des résultats de l'expérimentation #1 138
6.2. RESULTATS DE L'EXPERIMENTATION : INTERPRETATION DES MODES DE REPRESENTATION ET IMPLICATION DE LEUR DIVERSITE 141
6.2.1. La communication textuelle des zones les plus touchées et leur estimation 141
6.2.2. Cartographier la convergence et la divergence de plusieurs interprétations 144
6.2.3. Estimation des niveaux de certitude des participants et de lisibilité des cartes 153
6.2.4. Classification des cartes par ordre d'efficacité visuelle 157
6.3. SYNTHESE DE L'EXPERIMENTATION #1 159
CONCLUSION INTERMEDIAIRE : **160**

PARTIE 3 : PROPOSITION D'UNE REPRESENTATION CARTOGRAPHIQUE POUR L'OPTIMISATION DE L'ANALYSE DES DOMMAGES AUX PETITES ÉCHELLES 162

CHAPITRE 7 : FACILITER L'ANALYSE SPATIALE DE DONNEES THEMATIQUES PAR LES METHODES D'AGREGATION STATISTIQUES 165

7.1. LE QUADRILLAGE GEOMETRIQUE COMME SUPPORT D'ANALYSE SPATIALE, INTERETS ET CONTRAINTES 165

7.1.1. Avantages d'un quadrillage géométrique dans la visualisation des données à différentes échelles 165

7.1.2. Contraintes du quadrillage géométrique 167

7.1.3. De l'implantation zonale à l'implantation ponctuelle 168

7.2. PROPOSITION D'UNE REPRESENTATION FONDEE SUR LE SEMI-REGULIER DE POINTS 170

7.2.1. Vers la visualisation d'une information qualitative et quantitative : 170

7.2.2. Choix techniques et sémiologiques pour la représentation du semi-régulier de points proportionnels 175

CHAPITRE 8 : ANALYSER LES CAPACITES COGNITIVES ET SENSORIELLES DES REPRESENTATIONS CARTOGRAPHIQUES DES DOMMAGES POST-CATASTROPHES 182

8.1. MESURES DE L'ACTIVITE COGNITIVE A PARTIR DE LA MEMORISATION D'UNE INFORMATION THEMATIQUE 182

8.2. MESURES DE L'ACTIVITE VISUELLE A PARTIR DU SUIVI OCCULOMETRIQUE 183

CHAPITRE 9 : EXPERIMENTATION #2, EVALUATION DE L'EFFICACITE COGNITIVE DES REPRESENTATIONS DES DOMMAGES 185

9.1. DEFINIR LES CAPACITES COGNITIVES DE REPRESENTATIONS STANDARDS ET EXPERIMENTALES POUR UN GROUPE D'UTILISATEURS VARIES 185

9.1.1. Protocole de l'expérimentation #2 185

9.1.2. Traitement et exploitation des résultats de l'expérimentation #2 192

9.2. RESULTATS DE L'EXPERIMENTATION #2 : 195

9.2.1. Profil des participants 195

9.2.2. Résultats de la phase d'analyse visuelle 204

9.2.3. Résultats de la phase de mémorisation des données transmises par les cartes de dommages 210

9.2.4. Évaluation des types de représentation cartographique des dommages 220

9.3. SYNTHESE DE L'EXPERIMENTATION #2 225

CHAPITRE 10 : EXPERIMENTATION #3, EVALUATION DES CAPACITES SENSORIELLES DES REPRESENTATIONS DES DOMMAGES 226

10.1. DEFINIR LES CAPACITES SENSORIELLES DES REPRESENTATIONS DES DOMMAGES POST-CATASTROPHES POUR UN GROUPE D'UTILISATEURS HOMOGENES 226

10.1.1. Protocole de l'expérimentation #3 226

10.1.2. Traitement et exploitation des résultats de l'expérimentation #3 234

10.2. RESULTATS DE L'EXPERIMENTATION #3 : 235

10.2.1. Résultats de la phase d'analyse visuelle des participants : traitements statistiques 235

10.2.2. Résultats de la phase d'analyse visuelle des participants : Analyse oculométrique 243

10.2.3. Évaluation des critères d'éfficacité et d'esthétisme des types de représentation cartographique des dommages 248

10.3. SYNTHESE DE L'EXPERIMENTATION #3 250

CONCLUSION INTERMEDIAIRE : 252

PARTIE 4 : DE L'EXPERIMENTATION AU DEVELOPPEMENT DE NOUVEAUX SUPPORTS CARTOGRAPHIQUES DYNAMIQUES 254

CHAPITRE 11 : RESULTATS MAJEURS ET DISCUSSION AUTOUR DES PROTOCOLES EXPERIMENTAUX 256

11.1. RESULTATS MAJEURS DES PROTOCOLES EXPERIMENTAUX 256

11.1.1. La place du semi-régulier de points proportionnels face aux méthodes traditionnelles 256

11.1.2. Le rôle des critères subjectifs dans l'efficacité d'une carte 259

11.2. DISCUSSION AUTOUR DES PROTOCOLES EXPERIMENTAUX, FORCES ET LIMITES 261

11.2.1. Expérimenter les dimensions perceptives et informationnelles des cartes 261

11.2.2. Forces et faiblesses des protocoles d'expérimentation 262

CHAPITRE 12 : DES RESULTATS EXPLOITABLES POUR LA CARTOGRAPHIE DES DOMMAGES POST-CATASTROPHES 267

12.1. VERS UNE VISUALISATION CONTINUE DES DONNEES GEOGRAPHIQUES A TRAVERS LA MONTEE OU LA DESCENTE D'ECHELLE 267

12.1.1. L'importance du changement d'échelles pour représenter les dommages 267

12.1.2. Assurer l'emboitement statistique d'un quadrillage géométrique 268

12.1.3. Application à la cartographie intégrée d'un territoire cycloné (Saint-Martin, ouragan IRMA, 2017) 274

12.2. DE LA CARTE NUMERIQUE STATIQUE A LA CARTE NUMERIQUE DYNAMIQUE 278

12.2.1. Création d'un support dynamique pour le transfert des connaissances et des retours d'expérience 278

12.2.2. Création d'une méthode semi-automatique d'exploitation multi-échelle des dommages à partir d'une architecture logicielle libre 286

12.3. L'INFORMATION ET LA COMMUNICATION DE L'INCERTITUDE POUR LES SITUATIONS D'URGENCE 295

12.3.1. Le cheminement de l'incertitude dans la cartographie post-catastrophes 295

12.3.2. Les processus graphiques existants pour représenter l'incertitude 302

12.3.3. Représentation de l'incertitude attributaire par des stimuli visuels naturels : la variable d'occultation 305

CONCLUSION ET PERSPECTIVES 311

BIBLIOGRAPHIE 321

LISTE DES FIGURES : 344

LISTE DES TABLEAUX : 350

LISTE DES ANNEXES : 351

ANNEXES 352

Listes des abréviations

API : Application Programming Interface
CECM : Charte Espace et Catastrophes Majeurs
CNES : Centre National des Etudes Spatiales
COGIC : Centre Opérationnel de Gestion Interministérielle des Crises
CSA : Agence Spatiale Canadienne
DDT : Direction Départementale des Territoires
DICRIM : Document d'Information Communal sur les Risques Majeurs
DREAL : Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
EMS : Emergency Management Service
ERP : Etablissement recevant du public
ESA : Agence Spatiale Européenne
FTP : File Transfert Protocol
GMES : Global Monitoring for Environment and Security
GPS : Global Positioning System
GRED : Gouvernance, Risque, Environnement et Développement
IDW : Inverse Distance Weighing
IGN : Institut national de l'information géographique et forestière
IPC : Programme International de Cartographie
ITHACA : Information Technology for Humanitarian Assistance, Cooperation and Action
IWG-SEM : International Working Group on Satellite-based Emergency Mapping
JRC : Joint Research Centre
LiDAR : Light detection and ranging
LIRMM : Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier
NDRCC : Centre National de réduction des Catastrophes de Chine, : Centre National de Prévention des Catastrophes
NTIC : Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication
OGC : Open Geospatial Consortium
OLD : Obligations légales de débroussaillement
ONU : Organisation des Nations Unies
PCS : Plan Communal de Sauvegarde
PLU : Plan Local d'Urbanisme
PPR : Plan de Prévention des Risques
REX : Retour d'Expérience
SA : Sentinel Asia
SAD : Systèmes d'Aide à la Décision
SADG : Systèmes d'Aide à la Décision de Groupe
SEM : Sattelite based Emergency Mapping
SERTIT : Service Régional de Traitement d'Image et de Télédétection
SFS : Simple Features Specification for SQL
SGBDRO : Système de gestion de base de données relationnelle et objet
SIC : Systèmes d'Information et de Communication
SIG : Systèmes d'Information Géographique
SPC : Service de Prévention des Crues
SPOT : Système probatoire d'observation de la Terre ou Satellite pour l'observation de la Terre
TIREX : Transfert des apprentIssages et des Retours d'Expériences
UMR : Unité Mixte de Recherche
UNOSAT : United Nations Institute for Training and Research
VHSR : Very high spatial resolution
WFS : Web Feature Service
WMS : Web Map Service

Présentation des structures d'accueil (LAGAM et RisCrises)

Fondé en janvier 2021, le Laboratoire de Géographie et d'Aménagement de Montpellier[1] (LAGAM) est issu de la scission des deux tutelles de l'ex-UMR GRED, à savoir l'Université Paul-Valéry Montpellier 3 et l'IRD. Ce laboratoire de recherche universitaire a pour ambition de redonner une place centrale aux approches géographiques et à leurs prolongements opérationnels, notamment en aménagement du territoire, environnement et gestion des risques, en mobilisant la recherche-action, l'expertise de terrain, l'analyse spatiale, la cartographie, la modélisation, la co-construction et le transfert de connaissances.

L'équipe mobilise tous les outils de la géographie et gère un plateau technique en web-cartographie / SIG et des solutions géomatiques au service de plusieurs projets de recherche à forte valeur opérationnelle. Elle opère également des missions aériennes au moyen de drones et en assure les *post*-traitements photogrammétriques.

Créée en 2014, la SARL RisCrises[2] (PME) regroupe un bureau d'études et un organisme de formation spécialisé dans l'analyse, la gestion et la prévention des risques naturels, industriels, technologiques et professionnels. Déployée sur 3 départements, la société est composée d'un siège social (basé à Alès) ainsi que de deux antennes (Montpellier et Bordeaux).

RisCrises intervient sur la thématique de la prévention des risques en réalisant des analyses de risques majeurs (inondations, incendies, etc.) et des diagnostics de vulnérabilité. La structure intervient également sur la thématique de la gestion de crise à travers, d'une part, l'élaboration de plans d'urgence à destination des communes, des écoles, des industries, ainsi qu'au maintien des activités des organisations et d'autre part dans l'organisation et l'animation d'exercice de crise. Le bureau d'études propose également des solutions cartographiques répondant aux besoins variés de ces clients. Elle réalise ainsi des cartographies opérationnelles, explicatives (à destination du grand public), scientifiques (indicateurs spatiaux, articles scientifiques, etc.), sur papiers, mais également numériques au moyen des WebSIG (PostGreSQL, PostGIS, Leaflet, etc.).

[1] Site du LAGAM : https://lagam.xyz/
[2] Site de RisCrises : https://riscrises.com/

Introduction générale

Dans un monde où les flux d'informations sont numériques ou en voie d'être numérisées (***Ory, 2016***), la carte joue invariablement un rôle important dans les usages de l'Homme. De sa genèse à aujourd'hui, la carte a répondu au besoin de localiser, spatialiser, décrire et comprendre l'espace qui nous entoure. Son évolution fait suite à plusieurs grandes périodes de réforme (***Palsky, 1998***) durant lesquelles la conception cartographique devient une véritable discipline scientifique présente dans de nombreux domaines, dont la géographie (***Bessadok, 2015***). La carte est un outil de médiation entre un émetteur et un récepteur (***Jacob, 1992***). Elle communique une information géographique, tangible ou non, au moyen de propriétés graphiques et de design (***Plantin, 2014b***). Ces notions donnent lieu à deux courants de recherche cartographique (***Palsky, 2012***) : la sémiologie graphique (***Bertin, 1967***) et le *map design* (***Robinson, 1952***). Ces deux courants mettent tous deux l'accent sur les notions de langage graphique et de paradigme de l'efficacité malgré des approches différentes, plus expérimentales pour le *map design* et plus théorique pour la sémiologie graphique (***Palsky, 2012***). Au-delà des aspects fonctionnels, la carte a également une portée cognitive (***Lascoumes, 2007***) car elle présente des vérités subjectives liées à un contexte social, historique et à la propre vision/expérience des réalités géographiques de son concepteur.

Devenue plus accessible grâce à l'avènement d'internet (***Noucher, 2017***), le panel d'utilisateurs et de concepteurs de la carte s'est étendu, marquant ainsi une nouvelle ère de la cartographie dans laquelle la conception cartographique se démocratise et s'informatise. Les Technologies de l'Information Géographique (TIG) deviennent les principaux outils, techniques et méthodes permettant la cartographie contemporaine (***Mericskay, 2011***). Parmi elles, les Systèmes d'Information Géographique (SIG) permettent de rassembler des données de sources et de natures diverses, de procéder à des analyses spatiales à partir des scénarios possibles et apporter ainsi une aide à la décision (***Zanin, 2006b***). L'évolution de l'architecture des SIG a également bénéficié au développement du *web mapping* et à la création de supports de plus en plus numériques et participatifs. Ainsi, appuyé par les propriétés du *web mapping*, le grand public s'est progressivement approprié les TIG (***Mericskay, 2011***). Aujourd'hui la carte n'est plus réservée aux professionnels. Elle devient un outil d'expression pour un public varié, sans pour autant que ces derniers maitrisent les connaissances essentielles à la réalisation de bonnes cartes (***Bord, 2012***). Mais qu'est-ce qu'une bonne carte ? Ou du moins qu'est-ce qu'une carte efficace ?

Il est possible de définir cette efficacité à partir des processus de lecture d'une carte et de la différence entre les informations cartographiées par le concepteur et la perception de ces informations par un groupe d'utilisateurs cible (***Popelka et al., 2012***). Cette différence sera diminuée ou augmentée par les capacités graphiques de la carte à faire passer un message clair et précis. Toutefois, d'autres paramètres entrent en jeu comme les capacités cognitives et sensorielles de l'utilisateur. De ces capacités dépendent l'acquisition, l'interprétation et la mise en mémoire du message final que communique la carte (***Crampton, 2001 ; Fairbairn, 2006 ; Jégou & Deblonde, 2012***). Ainsi, une carte efficace assure une interprétation équivalente au message que souhaite retranscrire le concepteur (***Petchenik, 1977***). Pour cela, ce dernier fait appel à un langage graphique favorisant le caractère monosémique de la perception spatiale (***Bertin, 2005***) et réduisant par convention les erreurs et les mauvaises interprétations possibles.

La réduction des erreurs et des mauvaises interprétations est d'autant plus importante dans le domaine de la gestion des risques et des crises. La carte y est un outil d'évaluation, de reconstitution, de contrôle, de sensibilisation, mais également de planification (***Leone et al., 2010***). À travers ces différents usages, elle intervient en amont, pendant et après un événement majeur et concerne une pluralité d'acteurs allant du scientifique au citoyen, décideurs locaux ou encore forces de secours. Or, dans ce domaine et plus particulièrement en gestion de crise, un grand nombre de représentations graphiques et de cartes s'avèrent incapables de communiquer et de visualiser une information de manière efficace (***Kuvedžić Divjak & Lapaine, 2014***). Les chercheurs mettent en avant des problèmes récurrents comme l'absence de standards dans la symbolisation cartographique, la surcharge visuelle nuisant à la lisibilité des informations ou encore le manque de retours d'expérience utilisateur et de co-construction entre les cartographes et leur public cible (***Akella, 2009; Caron & Roche, 2001; Dymon, 2003; Girres et al., 2018; Kuveždić Divjak & Lapaine, 2018; Péroche, 2016***). Alors même que le rôle de ces cartes est central dans la gestion de crise (***Le Bourhis, 2007; Martinais, 2007***), le manque de prise en compte des exigences de la communication et de la visualisation cartographique représente un risque d'abandon et de sous-utilisation de ces cartes (***Gueben-Venière, 2019***).

Au lendemain du passage du cyclone Irma sur les Petites Antilles Françaises le 6 septembre 2017, l'absence de moyens de communication avec les territoires de Saint-Barthélemy et de Saint-Martin et d'information sur les conséquences de l'événement a laissé craindre le pire pour les autorités régionales et nationales (***Moatty et al., 2019, Péroche et al., sous presse***). Peu de temps après la catastrophe, une série de cartes a fait état de lourds dommages aux infrastructures. Ces premières évaluations ont été produites par des services de cartographies rapides opérant à la suite de l'activation de la Charte internationale « Espace et Catastrophes Majeurs » et de l'initiative Copernicus EMS. Ces deux organismes interviennent respectivement depuis 2000 et 2008 lors de situations d'urgence. Ils fournissent des informations géographiques, produites majoritairement par la photo interprétation des images satellites, qui sont utiles aux gestionnaires de crise et aux opérations de terrain *(****Stevens, 2008***). Du point de vue scientifique, ces informations sont intéressantes à analyser pour réaliser un état des lieux des dommages, un suivi de la reconstruction et comprendre leurs dynamiques spatiales. Elles apportent une dimension spatiale inédite vis-à-vis des procédés de diagnostic de terrain qui se révèlent plus chronophages et limités dans l'espace.

Les cartes et données produites par ces organismes suite au cyclone Irma ont été exploitées dans le cadre du projet ANR TIREX[3] (Transfert des apprentissages et des Retours d'Expériences scientifiques). Ce dernier a pour vocation de mener un retour d'expérience scientifique sur la compréhension des vulnérabilités territoriales de l'île de Saint-Martin et Saint-Barthélemy et dont le but est de renforcer l'adaptation des sociétés antillaises à des aléas hydroclimatiques susceptibles d'être aggravés par les effets du réchauffement climatique. Au-delà de l'acquisition de connaissances, le projet TIREX ambitionne d'assurer le transfert des résultats scientifiques vers les différents partenaires locaux, voire nationaux et internationaux. Pour cela, il s'appuie sur le développement d'outils et de supports d'informations dont la création d'une plateforme de géovisualisation dynamique et interactive sur les conséquences de l'événement. Dans le cadre de cette recherche à double finalité, fondamentale et opérationnelle, nous

[3] *Site du projet ANR TIREX :* https://tirex.univ-montp3.fr/

proposons de développer des procédés de visualisation des dommages standardisés et cohérents à plusieurs échelles spatiales (du local jusqu'au régional) en nous appuyant sur les données produites par les services de cartographies rapides et sur nos propres relevés de dommages réalisés *in situ,* quelques semaines après le passage du cyclone (mois d'octobre 2017). L'usage des données produites à partir de l'imagerie spatiale et leur comparaison avec les données de terrain révèlent les limites de l'analyse par photo-interprétation qui demeure particulièrement sensible à la nature de l'endommagement ainsi qu'à la structure du tissu urbain (***Andre et al., 2001; Rey et al., 2019; Candela et al., sous presse ; Péroche et al., sous presse***). La pratique de ces cartes soulève d'autres problèmes. Les cartes d'endommagement issues des services de cartographies rapides sont principalement diffusées sous une forme figée et au moyen de modes de représentations très variés et à des échelles qui le sont tout autant. À titre d'exemple, plus de 2000 cartes ont été produites à la suite du séisme d'Haïti en 2010. Cette diversité a montré le manque de consensus des pratiques cartographiques à l'échelle internationale (***Kerle, 2010, 2013; Kerle & Hoffman, 2013; Shankar et al., 2010***). En outre, la majeure partie de cette production n'a pas respecté les règles élémentaires de la sémiologie graphique et est même qualifiée de "catastrophe cartographique" par Voigt et al. (***2011***). Partant de ce constat, le risque principal est d'introduire des erreurs d'interprétation des cartes et donc de nuire à la planification des actions opérationnelles. À cela se rajoute le manque de retours d'expérience utilisateur, pourtant nécessaire, vis-à-vis d'un panel d'usagers qui tend à s'accroitre (***de Boissezon & Dubois, 2014***). Pourtant, comme toutes représentations cartographiques, il est essentiel d'introduire ces paramètres graphiques et ces retours d'expérience afin de garantir l'efficacité et la pérennité des supports notamment, lorsque ces derniers s'emploient à des fins de gestion de crise et de *post*-crise. Au cours de ces périodes, les conditions et la situation de stress aigu ne sont pas *optimum*s à la lecture d'une carte. Cette dernière doit être en mesure de fournir une vision d'ensemble de la situation utile et être un outil d'aide à la décision et de légitimation (***Gueben-Venière, 2019***).

Les objectifs de notre recherche :

Par l'étude de la cartographie des dommages *post*-catastrophes, cette thèse s'inscrit dans une continuité des recherches sur la communication d'information géographique dans la gestion des risques et plus spécifiquement, des crises et de la *post*-crise. De fait, nous profitons de la diversité des productions cartographiques *post*-catastrophes pour nous interroger sur ses conséquences dans l'interprétation par les utilisateurs, notamment au regard des grands paradigmes cartographiques qui ont influencé la façon dont les cartographes et géographes regardent et conçoivent la carte. Bien que ces questions aient été soulevées par les chercheurs en ce qui concerne les cartes de dommages *post*-catastrophes, elles n'ont pas directement fait l'objet d'études approfondies. Pour être efficace dans ce contexte particulier, une carte doit être lue, comprise et mémorisée facilement et rapidement par une vaste gamme d'utilisateurs tout en réduisant le « coût mental » (***Zipf, 1932, 1946***) nécessaire à la bonne perception visuelle et cognitive de l'information (***Bertin, 1967; Lambert & Zanin, 2016; Zanin, 2006a***), tout en garantissant la qualité des réponses apportées (***MacEachren, 1995***). La carte doit favoriser une interprétation similaire de la situation (***Gueben-Venière, 2019***) et ceci à toutes les échelles de travail, *c.-à-d.* à toutes les échelles de visualisation, afin de répondre aux besoins des différents acteurs qui interviennent à chaque échelon de la gestion de crise.

Face à ce qui semble être marqué par un manque consensus internationaux, notre recherche propose un premier état des lieux des cartes propice à la compréhension des paramètres clés à l'origine d'une telle diversité et à la définition d'un style cartographique. Puis dans un second temps, nous analyserons d'une part les conséquences de cette diversité et d'autre part l'efficacité des différentes méthodes de représentation des dommages sur l'interprétation individuelle et collective de plusieurs utilisateurs. Cela se formalise dans un premier temps autour de deux grandes questions de recherche :

1. Existe-t-il des caractéristiques visuelles communes qui favorisent la reconnaissance des cartes de dommages *post*-catastrophes ? Comment se caractérise la diversité cartographique observée ?
2. Comment la diversité des représentations des dommages influence-t-elle les interprétations individuelle et collective de plusieurs utilisateurs ?

Ces premières questions auront pour objectif d'élargir nos connaissances sur ce type de cartes dans le but de proposer des leviers de conception cartographique, répondant au besoin de réduction du « coût mental » nécessaire à la bonne interprétation de l'information en situation de crise pour l'ensemble des acteurs impliqués. Ceci nous amènera à une troisième question de recherche :

3. Comment proposer une représentation spatiale efficace, à la fois sur le plan visuel et cognitif, en situation de crise pour la diversité des acteurs impliqués ?

L'objectif final est de proposer une représentation cartographique qui réponde aux besoins d'optimisation de création et de partage des connaissances communes au sein d'une gamme d'utilisateurs de plus en plus variés, tout en réduisant les erreurs d'interprétations. En outre, il s'agira d'optimiser l'exploitation cartographique des données thématiques à travers les échelles spatiales et temporelles tout en assurant une méthode transférable à des processus de diffusion web.

La recherche menée dans le cadre de cette thèse s'est inscrite dans un dispositif CIFRE, au sein de RisCrises et de l'équipe LAGAM (Université Paul-Valéry Montpellier 3). Dès lors les objectifs définis visent la production d'outils pré opérationnels pour les structures d'accueil. Ainsi, les résultats de cette thèse ont pour vocation de développer des méthodes d'exploitation, de traitement et de représentation de données géographiques sous SIG transposables aux outils de géovisualisation web développés par le laboratoire LAGAM et le bureau d'études RisCrises. Ces deux entités ont toutes deux une expertise des sciences de l'information géographique développées à travers des supports de transfert de connaissances comme le projet C3AF[4] pour le LAGAM et des solutions cartographiques opérationnelles et d'aide à la décision pour RisCrises. Par ailleurs, le démarrage de cette thèse CIFRE est à l'origine de la création du pôle de Recherche et Développement (R&D) du bureau d'études avec pour objectif principal la création de solutions cartographiques numériques innovantes dans le domaine des risques et des crises. La cartographie des dommages représente un cas d'étude intéressant pour le développement des solutions cartographiques de RisCrises. Ce type de cartes, riches en informations utiles à la gestion de crise, sont faciles d'accès et couvrent de nombreux événements à l'échelle internationale (inondation, cyclone, tsunami, séisme, etc.). De plus, le public ciblé par ces cartes est en partie similaire aux clients du bureau d'études.

[4] *Plateforme d'information sur le changement climatique et ses conséquences sur les Antilles Françaises :* https://c3af.univ-montp3.fr/

Structure du manuscrit :

Ce manuscrit s'organise en trois parties et douze chapitres. **La première partie** présente un état de l'art général (première partie) qui introduit la cartographie, ses grandes évolutions, ses applications dans les processus décisionnels et plus particulièrement dans la gestion des risques et des crises. Cette approche de la cartographie par les risques aboutit à la présentation de la cartographie rapide des dommages *post*-catastrophes. Elle définit ses origines, les modes de diffusion existants, les utilisateurs cibles et les aspects techniques liés aux différentes méthodes d'acquisition de la donnée. Elle dévoile également les premiers problèmes rencontrés vis-à-vis de nos retours d'expériences de terrain (missions organisées dans le cadre du projet ANR TIREX cf. supra) et des questions soulevées sur la grande diversité des modes de représentations à l'échelle internationale, notamment à la suite du séisme de Haïti en 2010. L'étude de cet évènement catastrophique alimente les réflexions sur la compréhension des cartes, notamment vis-à-vis de la transmission d'une information géographique, et sur les modes de représentation traditionnellement utilisés par les services de cartographies rapides internationaux. Ces réflexions sont intrinsèques aux deux grands paradigmes de la communication et de la visualisation qui caractérisent le domaine de la cartographie depuis les années 50. À partir de cet état de l'art, plusieurs étapes méthodologiques se structurent.

La seconde partie cherche à approfondir les problématiques de la thèse par le biais d'une analyse cartographique et d'une première expérimentation (expérimentation #1) (Figure 1). Dans un premier temps, nous explorons les connaissances sur la définition d'un style cartographique afin de les appliquer aux cartographies de dommages *post*-catastrophes. Dès lors, nous nous intéresserons aux processus qui peuvent expliquer la diversité constatée de ce type de cartes à l'échelle internationale. Nous chercherons aussi à mettre en avant des modes de construction communs entre les différents concepteurs. Cette démarche propose un modèle d'analyse cartographique basé sur une grille d'analyse multicritère. Dans un second temps, nous testons les conséquences présumées de cette diversité cartographique sur la communication d'un message final en reprenant le cas concret du séisme de Haïti en 2010. Cette expérience permet également de tester les capacités d'interprétation de chacune des techniques utilisées par les services de cartographies rapides, que l'on retrouve encore aujourd'hui dans leur production.

Une troisième partie mobilise les premiers éléments de réflexions et de discussions au sein de la construction d'une méthode cartographique visant à pallier les lacunes observées. Cette dernière mobilise les capacités des Systèmes d'Information Géographique (SIG) et les règles de sémiologie graphique afin de proposer une méthode optimisée pour la lecture des dommages à travers les échelles cartographiques et plus particulièrement les petites échelles. Nous testons par la suite cette représentation au moyen de deux expérimentations utilisateurs (expérimentations #2 et #3) (Figure 1), qui permettent de caractériser les capacités à faciliter les traitements cognitifs et sensoriels de cette technique vis-à-vis de représentations préexistantes. Elles ont chacune une spécificité. L'expérimentation #2 cherche à tester les capacités de mémorisation sur un échantillon d'utilisateurs variés (étudiants, scientifiques, opérationnels, institutionnels) tandis que l'expérimentation #3 donne une analyse des stratégies du regard sur un échantillon homogène d'utilisateurs par le biais des technologies de l'Eye-tracking.

Dans une quatrième partie, nous présentons les résultats généraux des deux expérimentations (#2 et #3) et proposons d'exploiter le mode de représentation proposé par la création d'un continuum sémiologique et statistique à travers la descente ou la montée d'échelle. Deux démonstrateurs web offrent deux cas d'application : produire des représentations utiles aux transferts des connaissances scientifiques et produire des outils d'analyses utiles à la décision. Cette partie nous permet également d'établir un retour d'expérience sur la notion d'incertitude au sein des cartes de dommages *post*-catastrophes et de proposer une représentation spatiale des niveaux de fiabilité de la donnée affichée.

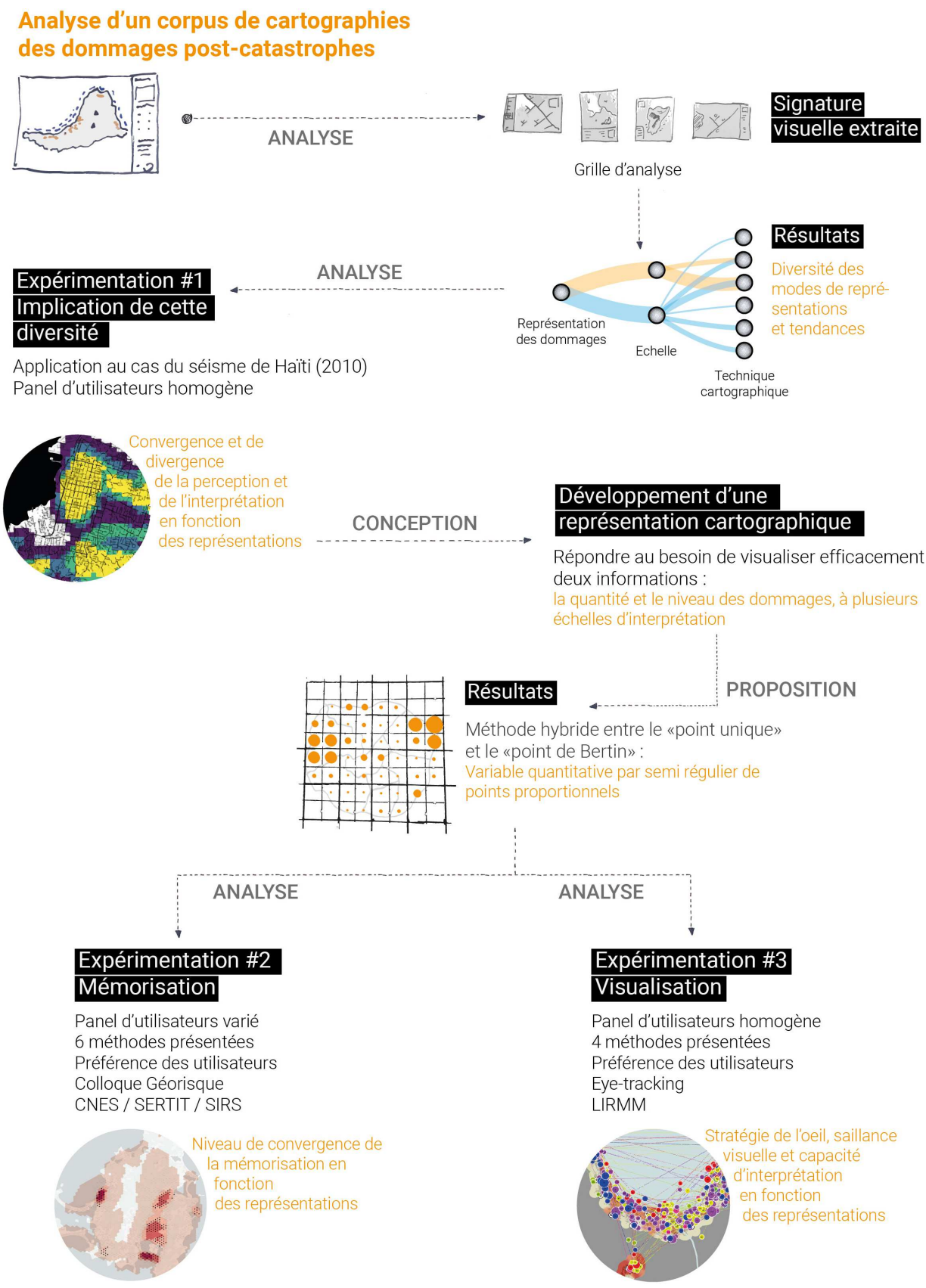


Figure 1 : Démarche méthodologique de la recherche



PARTIE 1 : CARTOGRAPHIE ET SEMIOLOGIE GRAPHIQUE AU SEIN DE LA GESTION DES RISQUES MAJEURS ET DES CRISES

Montagne Pelée, Martinique

Partie 1 : Cartographie et sémiologie graphique au sein de la gestion des risques majeurs et des crises

L'utilisation de la carte à des fins d'abstraction de la réalité en image graphique remonte à bien longtemps. Par sa capacité à montrer, la carte est un outil efficace utilisé dans de nombreux domaines et applications afin d'appuyer les processus décisionnels et opérationnels. En gestion des risques et des crises (naturels et technologiques), la carte joue de nombreux rôles. Elle permet d'évaluer, de modéliser, de contrôler et réglementer, d'informer et sensibiliser, mais aussi d'anticiper et planifier (***Leone et al., 2010***). Parmi les outils contemporains à disposition, cette thèse s'intéresse plus particulièrement à celui de la cartographie des dommages *post*-catastrophes qui intervient pendant ou très peu de temps après un choc (naturel ou technologique). Développées il y a près d'une vingtaine d'années et mobilisées pour différents événements marquants (tsunami de Sumatra en 2004 ; séisme de Haïti en 2010 ; ouragan Irma en 2017 ; tsunami de Palu en 2018), ces productions permettent de dresser un premier état des lieux d'une catastrophe sur un territoire. Les données sont récoltées depuis l'espace, grâce aux capteurs optiques et radars embarqués sur les satellites, et traitées par des services de cartographies rapides principalement par le biais de la photo-interprétation. Les produits finaux sont livrés sous la forme de cartographie numérique et de données vectorielles téléchargeables depuis des plateformes dédiés (FTP). Si ces outils représentent un véritable atout pour les gestionnaires de crises institutionnels, les retours d'expérience, font ressortir des problématiques d'acquisition, d'évaluation et de représentation cartographique qui peuvent nuire à la communication, à l'interprétation et in fine à la transmission des informations thématiques. Bien que ces problématiques soient théoriques, elles se fondent sur les concepts de communication cartographique et de visualisation cartographique (***Crampton, 2001; Dodge, 2014; Keates, 1964; Kraak, 2003; MacEachren, 2004; MacEachren & Kraak, 1997; Mattelart & Mattelart, 2004; Robinson & Petchenik, 1975; Shannon & Weaver, 1949***). Ces grands concepts de la cartographie, développés depuis les années 80, mettent en avant l'utilité des règles de sémiologie graphique dans la conception cartographique et l'intérêt de développer l'interaction entre l'homme et la carte, tant et si bien qu'aujourd'hui, créer une carte n'est plus uniquement le fait de spécialistes (***Bord, 2012***). En témoigne, la pléthore de cartes disponibles et de supports de géovisualisation (google maps, Géoportail, etc.) et d'outils permettant de les développer (Qgis, Arcgis, Leaflet, etc.). L'essor et la démocratisation des systèmes d'informations géographiques (SIG) et des représentations spatiales sur le web marquent une nouvelle ère du langage cartographique (***Mericskay, 2011, 2016; Mericskay & Roche, 2011***). Elle s'accompagne de méthodes, techniques et outils de visualisation de l'information géographique. Forte de ces approches empiriques et des évolutions techniques, la cartographie de crise fait l'objet de nombreuses recherches visant à optimiser l'efficacité de ces supports dans les processus décisionnels (***Akella, 2009; Girres et al., 2018; Konecny et al., 2010; Kuvedžić Divjak & Lapaine, 2014; Kuveždić Divjak & Lapaine, 2018***). Pourtant, concernant la cartographie rapide *post*-catastrophes (***André et al., 2001; de Boissezon & Dubois, 2014; Klett, 2011; Voigt et al., 2011; Yésou et al., 2015a***), l'état de l'art révèle l'absence d'études approfondies dédiées aux aspects cartographiques et aux contraintes liées à leur utilisation (***Kerle, 2013; Kerle & Hoffman, 2013***).

Chapitre 1 : Genèse cartographique et évolution, de l'abstraction à la prise de décision

1.1. La cartographie, une abstraction des réalités géographiques

1.1.1. *Genèse de la cartographie : représenter l'espace connu*

Aujourd'hui, la carte est partout, notamment grâce au web qui en facilite l'accès (***Noucher, 2017***). Elle se retrouve dans les outils de navigations, les applications, les bulletins météo, les journaux, etc. Tant et si bien que se poser la question, « qu'est-ce qu'une carte ? », n'est pas si banal. Afin de répondre à cette question, commençons tout d'abord par fournir un cadre historique à la notion de cartographie. Étymologiquement, le mot « cartographie » provient du grec « *Χάρτης* » et désigne le papier et l'action de dessiner. Il s'agit donc de la pratique et de la réalisation des cartes, dont la genèse remonte à bien longtemps. En effet, cette cartographie est entrée en scène dès lors que l'homme a eu besoin de localiser, spatialiser et comprendre l'espace qui l'entoure. Ainsi, il existe un lien étroit entre la notion de cartographie et celle de géographie qui relève également du facteur d'espace, de ses propriétés (sociales, institutionnelles, organisationnelles, naturelles, etc.) et que l'on peut résumer par la notion de territoire (***Claval, 2008; Di Méo, 1998; Raffestin, 1986; Sibertin-Blanc, 2010***)

La première fois que le monde « connu » est représenté, c'est en Irak près de 600 ans avant notre ère. Une tablette d'argile est découverte, montrant Babylone et sa région. Puis c'est durant l'antiquité, avec ses savants grecs tels qu'Anaximandre le Milésien, que la cartographie va bénéficier d'un développement intellectuel et technique important grâce aux progrès de l'astronomie et de la géométrie (***Jacob, 1985***). En remontant encore plus loin, à l'âge du Bronze, les hommes dessinaient l'une des plus anciennes cartes découvertes, sur les parois de la grotte de Bedolina[5] (Italie) il y a plus de 4 000 ans (Figure 2) (***Christinger, 1965***). Chez nos ancêtres, existait déjà le souci de la représentation des lieux de vie et des migrations à travers la notion informelle d'une première démarche géographique (***Clozier, 1972***).

[5] Gravures originales : *https://www.sciencesetavenir.fr/archeo-paleo/ethnologie/les-premieres-cartographies-par-christian-jacob_117479*



Figure 2 : Village mythique et croix labyrinthique, Bedolina, Val Cannonica (Christinger, 1965) : gravures réalisées entre l'âge du Bronze et l'âge du Fer (3000 av. J.-C)

Ses premières utilisations servent donc à illustrer le territoire connu, montrer les frontières naturelles et celles choisies par l'homme. La cartographie sert aux déplacements des troupes, aux itinéraires des navires marchands, à l'aménagement du territoire (***Lascoumes, 2007***). L'homme ressent alors le besoin d'établir des plans et de développer une transcription fidèle du monde qui l'entoure. La table de Peutinger (***Arnaud, 1990; Barrière, 1943; de Fortia d'Urban, 1845***), qui signale les principales voies de communication de l'Empire romain, en est un exemple parmi tant d'autres. Par ailleurs, il n'est pas fortuit de voir que l'histoire « linéaire » telle qu'elle est aujourd'hui apparait dès lors que la cartographie connait ce développement significatif (***Christinger, 1965***).

1.1.2. *La cartographie : de l'usage fonctionnel aux approches scientifiques*

La pratique cartographique est d'abord née par utilité. Cependant, cette pratique était vouée à devenir une discipline à part entière avec l'apport des savants de l'antiquité : une cartographie académique qui considère que la carte n'est pas un simple produit et ne doit pas être réduite à un simple aspect technique. La carte est un objet d'étude scientifique (***Eckert, 1921; Scharfe, 1986***) dont les recherches évoluent à l'occasion des phases de mutations intellectuelles, techniques qui impliquent leur conception ainsi que de leur usage. Palsky (***1998***) parle des grandes périodes de « réforme » vécues par la cartographie. La première est liée aux innovations technologiques et sociales de la Renaissance (***Noucher, 2015***). Il est d'ailleurs bon de noter qu'un peu plus tard, à partir du 17e siècle, le mot « carte » est adopté en géographie (***Bessadok, 2015***). La seconde réforme est identifiée après la Seconde Guerre mondiale. Dès lors, les produits cartographiques connaissent un développement et une diversité croissante qui conduisent cette pratique à devenir une véritable discipline scientifique. Dans « l'empire des cartes », Jacob (***1992***) présente la carte comme une médiation dont la reconnaissance n'arrive que très tardivement dans son histoire. Par médiation, l'auteur parle de la place qu'elle occupe entre l'émission et la réception de l'information. Cette approche est née de la rencontre entre la théorisation de la carte et celle de l'information. « Théorie de l'information qui désigne toutes réflexions sur la transmission d'informations et qui évoluent avec le développement des systèmes technologiques

d'information à partir du 18e » (***Flichy, 1995 ; Mattelart & Mattelart, 2004***). Cette théorie appliquée à la carte est mobilisée par les cartographes et les géographes. Elle permet de replacer la carte comme pôle récepteur de l'information et de mettre en évidence les propriétés graphiques et de *design* dans le passage de l'information (***Plantin, 2014b***). En lien avec cette théorie de la communication, deux courants de pensée cartographique (***Palsky, 2012***) font leur apparition : la sémiologie graphique instituée par Bertin (***1967***) et celle du *map design* de Robinson (***1952***).

Par la suite, la carte va bénéficier de l'apport des sciences sociales. Ces réflexions mettent de côté l'usage fonctionnel des cartes pour se concentrer sur leur portée cognitive (***Lascoumes, 2007***). Il s'agit d'étudier le message et de voir comment la carte est, et a été, un instrument d'action publique. Car la carte, malgré sa visée scientifique, est toujours subjective et présente une « vérité » liée à son contexte social ou encore historique. Elle est un objet bien étrange qui fournit de nombreux sujets à explorer (***Jacob, 1992; Lascoumes, 2007; Palsky, 2003; Plantin, 2014b***). Quant aux recherches contemporaines, elles se focalisent sur la capacité de communication de la carte, de la visualisation d'informations et l'exploration de données (***Plantin, 2014b***). Nous reviendrons ultérieurement sur ces grands changements de paradigmes et leur impact sur la conception cartographique (cf. infra 4).

Le Programme International de Cartographie (IPC) donne une définition actualisée de la carte. Elle est définie comme étant « la représentation symbolisée de la réalité géographique, représentant certains traits ou caractéristiques résultant de l'effort créatif de l'exécution des choix de son auteur, et est conçue pour être utilisée lorsque les relations spatiales sont d'une importance primordiale »[6]. Même si la définition de la carte a bien évidemment évolué dans le temps, que ses techniques de conception sont bien loin de ses débuts, l'objet reste le même : une matérialisation du réel qui se caractérise par des phénomènes tangibles ou non, et qui fait référence dans la pratique aux cartes topographiques et thématiques.

1.1.3. *Carte topographique, carte thématique : typologie de la carte*

Les cartes sont utilisées pour explorer et analyser le monde réel grâce à leur capacité à faire une abstraction de réalités géographiques complexes (***Kraak, 2005***). En tant qu'abstraction du réel, la carte renvoie à deux grands types de cartes, les cartes topographiques et les cartes thématiques :

- Les cartographies topographiques : « Il s'agit de la représentation des phénomènes physiques tangibles à moyenne ou petite échelle des éléments naturels et artificiels situés sur la surface terrestre, ainsi que des formes du terrain. On les distingue du plan topographique par le fait qu'elles utilisent des signes conventionnels pour représenter des détails importants, comme les voies de communication ou les bâtiments isolés, et choisissent de ne pas les mettre à l'échelle ». (Lexique topographique, association française de topographie[7])

[6] Définition de la carte selon l'IPC : http://icaci.org/strategic-plan
[7] Lexique topographique : http://www.aftopo.org/FR/lexique-7.html

- Les cartographies thématiques : en plus de sa capacité à représenter les éléments physiques, la carte a également la capacité de transmettre une information géographique sur les phénomènes intangibles (***Kraak & Fabrikant, 2017***). Il faut entendre par là, les phénomènes localisables, de toute nature, qualitatifs ou quantitatifs et qui pourraient être imperceptibles à l'œil nu. Il s'agit de réalités abstraites (**Clutton, 1983**) telles que la répartition des richesses, les seuils de migration, les tendances politiques, etc. Les cartes thématiques donnent à voir des réalités invisibles, illustrant un sujet, un aspect, une distribution particulière et en les plaçant sur des fonds de carte (**Palsky, 1998**).

Cette séparation/opposition entre les cartes topographiques et thématiques, bien connue des géographes, n'est pourtant pas si évidente à définir de manière concrète. Ces derniers sont d'ailleurs partagés entre cartographie thématique et topographique à la fin du 19e (***Palsky, 2003***), et le scientifique français Charles Dupin (*1784-1873*) a été l'un des précurseurs des cartes thématiques modernes (***Palsky, 1996***).

En 1826, il a produit une *carte figurative de l'instruction populaire* (Figure 3). Les nuances de gris sont utilisées pour montrer les niveaux d'instructions allant du noir pour les zones les moins instruites au blanc pour les zones les plus éclairées. Vidal de la Blache perpétue ces constructions sociales du territoire Il décrit notamment des espaces différenciés, pas seulement par des conditions naturelles ou humaines d'une part, mais par des groupes sociaux qui n'ont pas la même interaction avec leur environnement (**Claval, 2008; de La Blache, 1903; Vidal de la Blache, 1888; Vidal de La Blache, 1910**). Les cartes thématiques répondent donc à un besoin analytique et exploratoire. Par ailleurs, le fait de montrer le monde sous des formes stéréotypées pousse à la création de conventions, de codes couleur et de symboles que l'on retrouve plus tard dans les traités de sémiologie graphique.

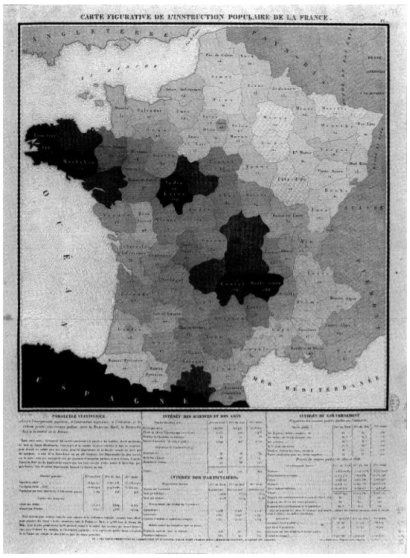
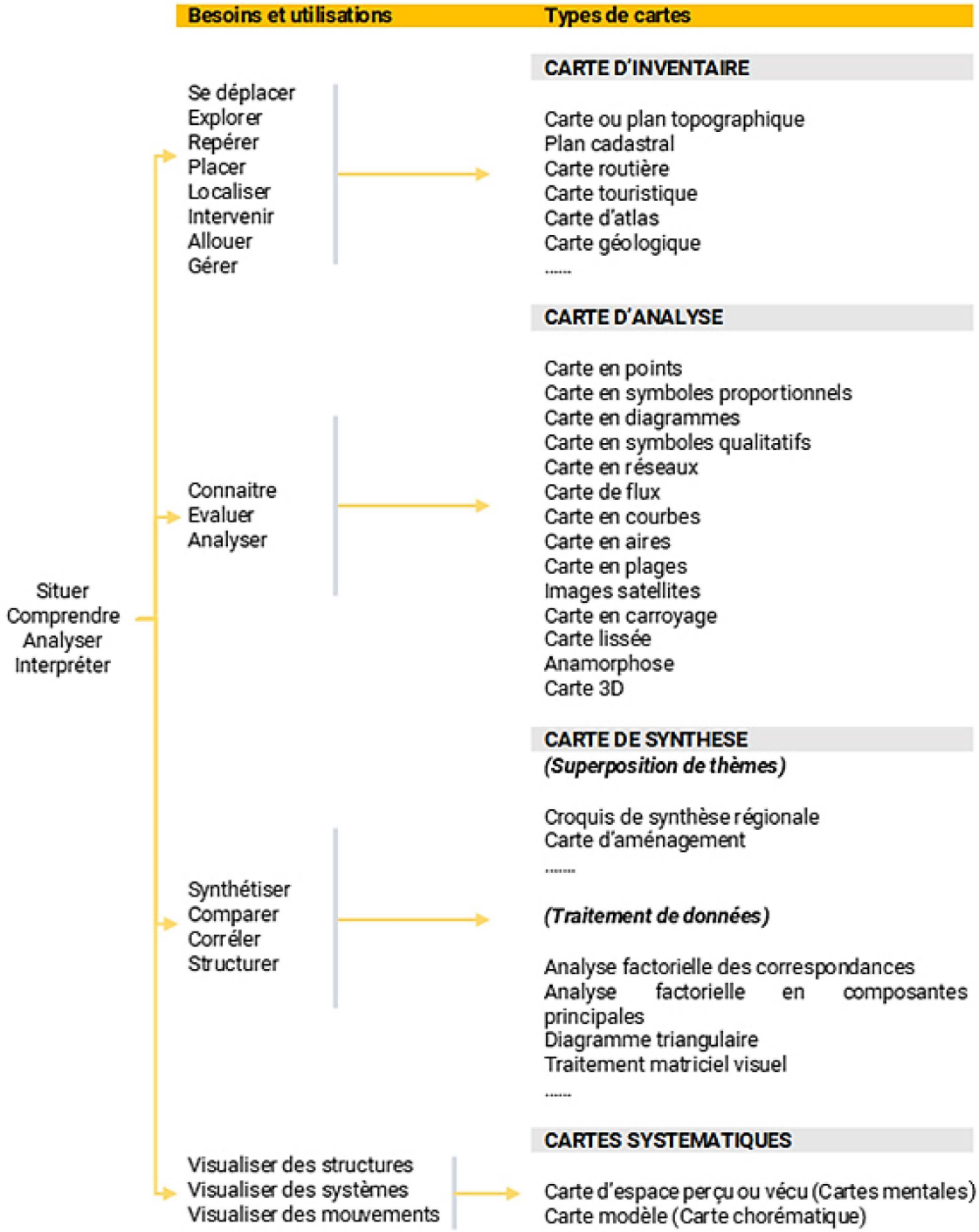


Figure 3 : Carte figurative de l'instruction populaire de Charles Dupin, 1826 (Bibliothèque Nationale de France, Paris)

S'il existe une telle différence dans les pratiques c'est que la cartographie a des usages variés. Par ailleurs, considérer qu'il n'existe que deux types de cartes est réducteur, mais *a contrario,* il est difficile d'en présenter toutes les facettes (***Joubert, 2015***). Par ces embranchements cartographiques, il est possible d'en établir une typologie (au sens large). Poidevin (***1999***) propose un tableau des grands types de cartes en fonction des besoins et des utilisations (Tableau 1).

Qu'est-ce la carte ? La carte et ses usages évoluent dans le temps. Elle répond à des besoins de localisation d'analyse, de comparaison et de synthèse qui, par la spatialisation des réalités physiques et/ou abstraites du monde qui nous entoure. La typologie de Poidevin (***1999***) met en exergue l'efficacité de la carte à des fins décisionnelles. La carte est considérée comme un outil d'aide à la décision et il convient alors de faire un aparté sur cette notion.

Tableau 1 : Typologie de la carte en fonction des besoins et des usages (Poidevin, 1999)



1.2. Principes et usages de la cartographie au sein des processus décisionnels

1.2.1. *Théorie de la décision et de l'aide à la décision*

La prise de décision est souvent assimilée à la notion de choix (***Noucher et al., 2008***). Cependant, elle relève d'un processus complexe dont l'étude et la formalisation résultent de plusieurs siècles de recherches (***Robert, 2002***). Ces dernières forment la théorie de la décision qui est à l'intersection de nombreuses disciplines telles que l'économie, la politique, la gestion, la psychologie comportementale, la cognition, les mathématiques et plus récemment l'informatique.

Dans son ouvrage « la théorie de la décision », Robert (***2002***) montre que cette réflexion répond, en premier lieu, au besoin du décideur, dès lors qu'il est responsable, de pouvoir rationaliser ses décisions et de les justifier. Il s'agit également de répondre au besoin de savoir comment analyser, décrire ses choix et leurs conséquences afin de mesurer la portée de ses actes. De manière générale, cette théorie peut s'appliquer à d'autres domaines que ceux précédemment cités. C'est le cas par exemple en aménagement du territoire, en environnement, en gestion des risques naturels. L'objectif est de promouvoir des choix rationnels et cela nécessite le développement d'une aide à la décision efficace et utile. Dans une définition constructiviste, l'aide à la décision peut être définie comme « l'activité de celui qui, prenant appui sur des modèles clairement explicités, mais non nécessairement complètement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponse aux questions que se pose un intervenant dans un processus de décision, éléments concourant à éclairer la décision et normalement à prescrire, ou simplement à favoriser, un comportement de nature à accroitre la cohérence entre l'évolution du processus d'une part, les objectifs et le système de valeur au service desquels cet intervenant se trouve placé d'autre part » (***Roy, 1993, p. 21***). Selon cette définition, la prise de décision ne peut se faire qu'en toute connaissance de cause et repose sur l'utilisation de modèles complètement formels, ou en partie. Elle se produit également autour des discussions conséquentes à ces modèles. Un processus complexe que l'on retrouve dans la définition de Zoller et Béguin (***1992***) dans laquelle, l'aide à la décision consiste à apporter une information qui va éclairer l'appréciation du décideur afin d'en déduire une projection des possibles en anticipation des phases de terrain plutôt que d'être en attente des résultats de cette dernière.

Ainsi, l'aide à la décision doit apporter une appréciation plus « **sûre** » et une anticipation « **correcte** ». Ces mots mettent en avant la notion de réduction de l'incertitude qui intervient dans les processus décisionnels. D'autres termes comme la « **rationalité** » des outils et la « **complexité** » des processus de décisions peuvent être liés à l'incertitude. Les verbes « **explorer** » **et** « **communiquer** » font référence à la représentation d'une ou plusieurs réalités. Ces termes renvoient à l'ensemble des outils qui permettent l'aide à la décision. Ainsi, « **gestion** » et « **décision** » sont donc des activités nécessairement liées. L'aide à la décision peut se résumer comme un ensemble des processus complexes venant répondre à une ou plusieurs problématiques par leur capacité à faciliter l'analyse des prescriptions/les actions que le décideur doit mettre en place pour les résoudre. Pour cela, le décideur ou le groupe de décideurs peuvent s'appuyer sur des outils ayant plusieurs formes.

1.2.2. *Les Systèmes d'Aide à la Décision*

Le thème de la décision est un champ d'études important, particulièrement dans les **S**ystèmes d'**I**nformation et de **C**ommunication (SIC) avec lesquels il constitue le concept de **S**ystèmes d'**A**ide à la **D**écision (SAD) (***Lebraty, 2006***). Ce concept est né dans les années 70 en Sciences de Gestion. Il est défini comme « un système informatisé interactif appuyant le décideur afin de manipuler des données et des modèles dans le but résoudre des problèmes mal structurés » (***Gorry et Scott Morton, 1971***). Ce concept a évolué et a donné naissance à de nouveaux champs d'études basés sur les prises de décision de groupe sous la forme de SADG (***DeSanctis et Gallupe, 1987***). En effet, lors de processus décisionnels, la responsabilité est bien souvent partagée. Dès lors, il est important de prendre en compte les relations de communication entre les décideurs et les supports qui aident aux échanges d'information. En outre, les sciences cognitives ou encore l'informatique permettent d'élargir les potentialités de ces systèmes d'aide à la décision. Parmi ces systèmes, les SIG ont une place privilégiée. Selon leur principale fonction, ils servent à **faciliter l'analyse des données en fonction des caractéristiques géographiques**.

1.2.3. *L'usage de la carte dans l'aide à la décision spatiale*

L'apparition conjointe des systèmes de l'information et de la communication ainsi que la multiplication des données à référence spatiale a favorisé l'utilisation des SIG dans de nombreuses disciplines et thématiques. Le fait que ces outils soient cités dans les SAD n'est donc pas anodin. La prise de décision revêt, de manière plus ou moins importante en fonction des domaines, une dimension spatiale qui invite les représentations cartographiques à tenir un rôle bien spécifique. De Blomac *et al.* (***1994***) donnent une définition des SIG comme « un ensemble de logiciels, données géographiques, mais également de personnels permettant la collecte, le traitement, et l'analyse d'informations géographiques ». Cette description, comme de nombreuses autres, montre bien que les SIG sont d'abord considérés comme de simples outils, logiciels permettant le traitement des données spatiales. Or, il ne faut pas oublier que les SIG servent à la cartographie contemporaine et que derrière ces outils se cachent de nombreuses fonctions liées à la carte. En permettant l'analyse spatiale et/ou statistique et l'interaction de phénomènes spatialisés, les SIG sont considérés comme des outils complets de connaissance, d'aide à la décision et de communication.

Ainsi, la carte participe aux processus d'aide à la décision et favorise différentes appropriations subjectives d'un même objet (***de Sède-Marceau et Moine, 2001***). Elle permet en outre de préparer la recherche de solutions consensuelles (***Noucher et al., 2008***) à partir de ces interprétations mixtes. Par ailleurs, comme le souligne Noucher et al. (***2008***), il n'y a pas de décision collective sans appropriation individuelle. Les outils de représentation du territoire ou de données géographiques, telles que les images satellites et les cartes statistiques ou thématiques, se montrent très utiles aux processus décisionnels impliquant plusieurs acteurs. Ils sont notamment essentiels dans l'aménagement du territoire et la gestion des risques naturels et technologiques (***Garry, 1996; Propeck-Zimmermann et al., 2002; Veyret et al., 2005; Veyret & Laganier, 2013***).

Chapitre 2 : La cartographie comme outil de gestion des risques majeurs et des crises

2.1. Concepts clés à la gestion des risques majeurs et des crises

2.1.1. *Notion de risque et d'espace à risque*

Qu'est-ce que le risque dans l'étude des risques naturels ? Jusqu'aux années 70, cette approche a été marginale en France (***Faugères, 1990***). Souvent lié à une approche pluridisciplinaire complexe, le terme de risque fait l'objet d'une appropriation grandissante des sciences géographiques à partir des années 80 (***Morel et al., 2010; Morel et al., 2006***) notamment avec l'introduction de la notion de vulnérabilité (***Wisner et al., 1976***).

Le risque peut être défini comme « la possibilité de pertes humaines, matérielles, économiques, environnementales, etc., causées par la manifestation brutale d'un phénomène (agent) naturel » (***Leone, 2007***). En d'autres termes, il s'agit « de la probabilité à perdre ce à quoi l'on tient » (***d'Ercole & Metzger, 2009***) causée par les dommages générés par « les effets du phénomène (naturel ou technologique) sur les éléments exposés et qui pourront être plus ou moins sévères en fonction de multiples facteurs socio-économiques, techniques, etc. » (***d'Ercole et al., 1995***). Cette définition implique une composante territoriale qui met en exergue les recherches sur les échelles spatiales et temporelles, les aires géographiques et par extension les influences culturelles (***de Richemond & Reghezza, 2010; Leone et al., 2010; Morel et al., 2006)*** . Elle permet également de raccrocher les termes d'aléa, d'enjeu et de vulnérabilité. Par aléa, on parle de phénomènes principalement naturels, le terme danger étant employé pour les processus liés aux activités humaines (stockage de matières dangereuses, rupture de barrage, etc.) (***Veyret et Laganier, 2013***). Par enjeu, il faut entendre la valeur humaine, économique ou environnementale des éléments exposés à l'aléa (***MATE, 1997***).

Les éléments exposés, les enjeux, dont parle d'Ercole et al. (***1995***) sont caractéristiques d'un territoire. Ils définissent sa constitution (bâti, infrastructures, espaces naturels, etc.), son fonctionnement (activités économiques, fonctionnelles et qui se composent d'une panoplie d'acteurs) et dont la hiérarchisation peut être réalisée à partir de leur valeur marchande ou utilitaire (***Leone, 2004***). Lorsque ces enjeux sont analysés vis-à-vis des connaissances sur l'aléa, nous pouvons en déterminer des potentiels dommageables, délimiter des espaces à risque (Figure 4) et créer différents scénarios nécessaires aux processus de gestion des risques.

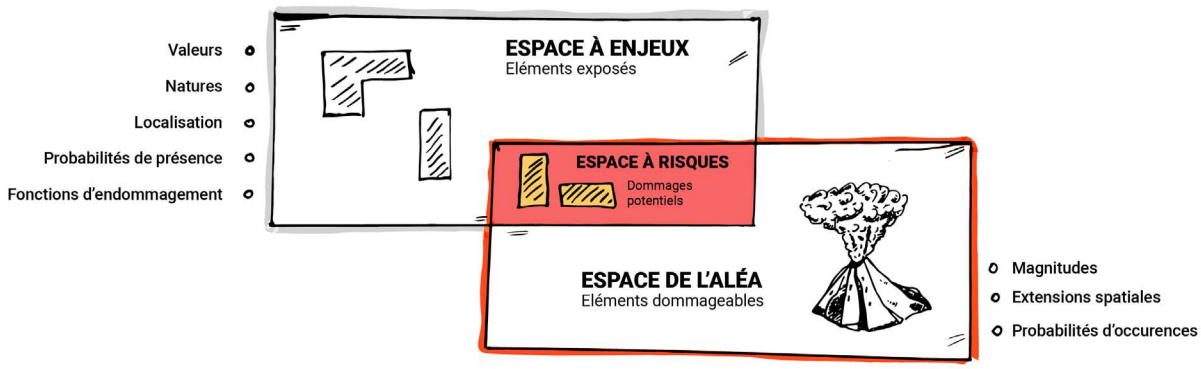


Figure 4 : Notion d'espace à risque et variables d'entrée (d'après Leone,2004 modifié Candela, 2021)

La vulnérabilité est plus complexe à définir. « Elle traduit la fragilité d'un système dans son ensemble en fonction de facteurs biophysiques ou sociaux, et de manière indirecte sa capacité à surmonter la crise provoquée par un aléa » (***d'Ercole & Pigeon, 1999; Veyret & Laganier, 2013***). Cette approche considère la vulnérabilité des sociétés, mais également leur capacité de résilience. Cette résilience fait l'objet encore aujourd'hui de nombreux débats. Étudiée par de nombreux géographes français (***Dauphiné & Provitolo, 2007; d'Ercole, 1991; Hernandez, 2010; Leone, 1996, 2007; Reghezza-Zitt et al., 2012***), elle désigne « la capacité d'un système social (par exemple une organisation, une ville ou une société) à s'adapter de manière proactive et à se remettre de perturbations perçues au sein du système comme non ordinaires et non attendues » (***Comfort et al., 2010***). En résumé, le risque peut se concevoir par l'étude des vulnérabilités des territoires et des hommes face à de multiples aléas. Dans ce cas de figure, les diverses composantes du risque territorialisé sont spatialisables et intégrables au moyen de la formule AEV/C : aléa-enjeux-vulnérabilités et capacités de résilience (***Defossez et al., 2018; Leone et al., 2017***) adaptée de Blaikie *et al.* (***dans Wisner et al., 2004***).

Finalement, lorsque cette formule se met en application et que l'événement attendu devient une réalité, la catastrophe qui en découle génère des dommages humains, matériels, financiers et environnementaux. Dauphiné (***2001***) définit la catastrophe selon cinq niveaux : l'accident, le désastre, la catastrophe, la catastrophe majeure et la super catastrophe (***Roux-Dufort, 2010***). Cette montée en puissance suggère donc que le risque n'est pas cloisonné à un espace précis, mais peut s'étendre et toucher plusieurs territoires[8].

2.1.2. Notion de risque majeur et d'espace à risque majeur

Qu'est-ce qu'un risque majeur ? Pour illustrer ce concept, la catastrophe de Fukushima en 2011 est souvent placée sous le feu des projecteurs. Considérée comme l'une des catastrophes majeures du début du XXIe siècle, son origine est liée à un puissant séisme (M.9,0), suivi d'un tsunami dévastateur (10-15m). Ces deux phénomènes mirent en branle les défenses de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi (***Müller, 2011***). L'explosion du 11 mars et le nuage nucléaire qui suivit contaminèrent les eaux

[8] cf. article de Leone et Vinet dans : http://www.univ-montp3.fr/gcrn/images/stories/Documents_pdf/georisques_1_lv_part1.pdf

et les terres environnantes. La menace de radioactivité obligea une évacuation de masse sur un rayon de 20 km autour de la centrale. Les dommages ont été estimés entre 225 et 450 milliards d'euros en mars 2014 (Source : AIEA[9]). Séisme et tsunami ont causé la mort d'environ 20 000 personnes, le déplacement de plus de 300 000 personnes et de nombreux dégâts matériels (Source : IRSN[10]). L'ampleur et les répercussions de cette catastrophe ont soulevé de nombreux débats alimentant la notion de risque majeur (Natech) : des risques dont la fréquence est très faible, mais dont le potentiel catastrophique est très élevé (***Farmer, 1977; Zimmermann, 1996***), dépassant les institutions et les systèmes de gestion locaux qui doivent alors gérer des relations de plus en plus complexes entre risque, catastrophe et espace

Lagadec (***1979***) donne une définition du risque majeur en s'inspirant de la notion britannique de *Major Hazards* qui apparait après la catastrophe industrielle de Flixborough en 1974. Dans ce concept, l'échelle spatiale tient une place prépondérante avec pour effet une mutation des systèmes de gestion des risques, tant d'analyse que dans leur maitrise (***Lagadec, 2012***). Appliqué au cas des risques industriels, Lagadec établit que « dès lors que le risque dépasse son enceinte industrielle, il faut en déduire de nouveaux enjeux sociétaux, économiques et techniques, mais également de nouveaux dommages potentiels. Les acteurs concernés sont à revoir et les prises de décisions qui se limitaient à ce territoire connu prennent une autre ampleur et se répercutent à l'extérieur. Ainsi, de nouveaux défis apparaissent et les échelles d'interventions ne sont plus les mêmes, incitant à remanier les systèmes d'information, de communication et de concertation ». Cela suppose que dès l'instant où le risque dépasse cette emprise connue, les acteurs concernés doivent naviguer entre connaissance (leur territoire vécu) et incertitude (les conséquences potentielles).

Cette notion, bien qu'appliquée aux risques industriels, trouve toute sa place au sein des risques de manière générale. Veyret et al. (***2005***) présentent le risque comme un créateur de nouveaux espaces sur lesquels doivent être appliquées des interdictions ou des réglementations, notamment en matière de constructions. Cette conception rejoint les travaux de Lagadec (***2012***) lorsqu'il présente ces nouveaux référentiels spatiaux qui ne tiennent pas compte des limites administratives et obligent une redéfinition des acteurs à mobiliser. L'espace urbain, à enjeux, doit être vu comme un espace vulnérable, qui rassemble d'autres risques, dont la gestion nécessite une coopération intercommunale et bien souvent une intervention de l'État. Ainsi, il est possible de synthétiser cette notion d'espace à risque majeur par la Figure 5.

Ce schéma illustre le changement d'échelles progressif de la gestion du risque en fonction de l'ampleur d'un événement, qu'il soit naturel ou technologique. À la notion de territoire, côtoie la notion d'espace. Pour la première, il s'agit du territoire vécu, administratif dans lequel s'opère une gestion interne, territoriale et qui intègre progressivement plusieurs territoires. Dans ces territoires, la gestion du risque se fait individuellement à travers de nombreuses actions, comme l'aménagement, la sensibilisation, etc. L'espace à risque n'est pas enclavé et s'étend au-delà des limites administratives. En outre, cela veut également dire que chaque territoire possède des vulnérabilités intrinsèques et capacités de résiliences différentes.

[9] Agence internationale de l'énergie atomique

[10] Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire

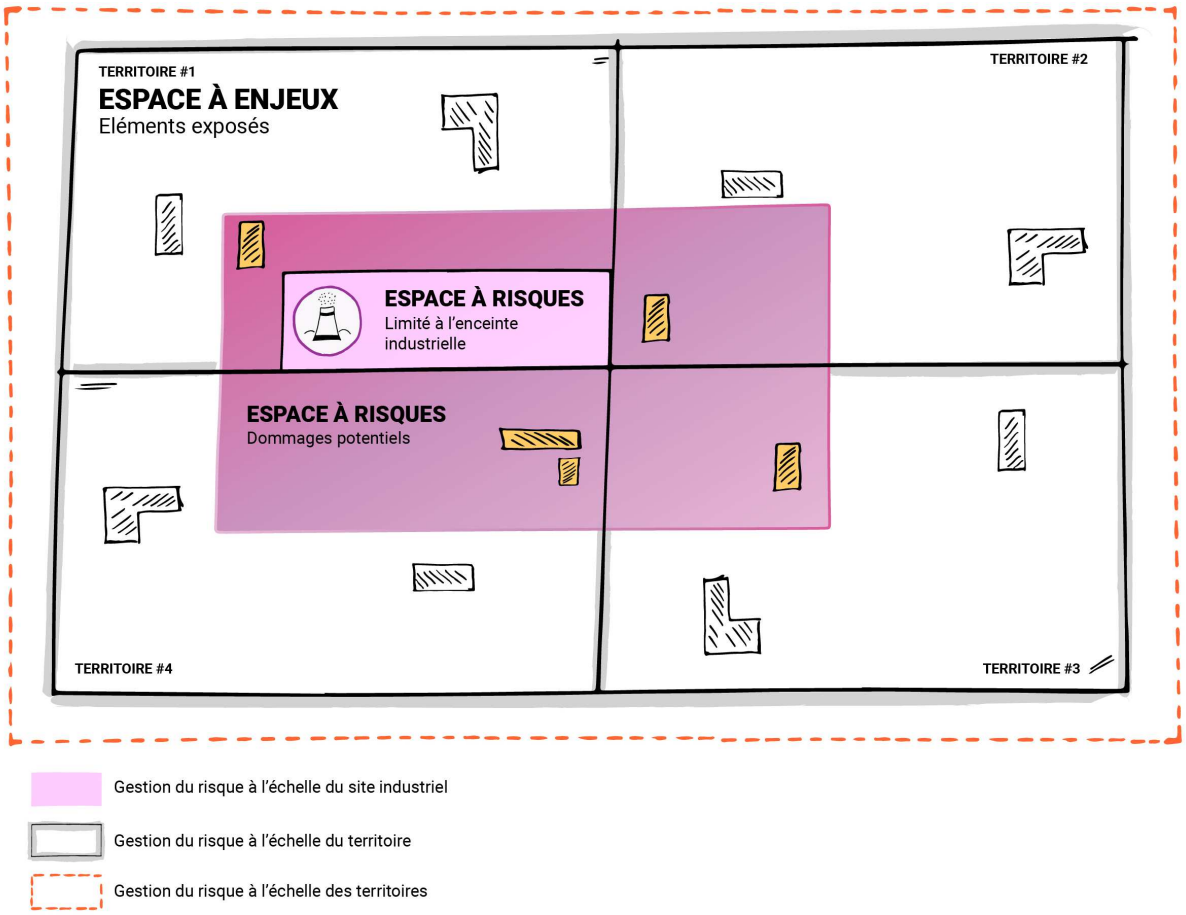


Figure 5 : Notion d'espace à risque majeur

Ainsi, le terme de risque se fond à travers les notions d'aléa, d'enjeu, de vulnérabilité, mais également de cindynique (***Morel et al., 2006***). Ce dernier terme, *Cindynique*, est né en 1987 (***Faugères, 1991***) dans un contexte de prise en compte du risque global (réchauffement climatique) et d'un nombre important de catastrophes industrielles et naturelles ayant eu lieu dans les années 70 et 80. Il est le fruit des initiatives internationales visant à répondre aux problèmes de gestion des risques avec une approche différente. Il met en avant la nécessité d'avoir une compréhension globale des phénomènes en cause afin de mieux anticiper la sécurité des populations exposées (***Georges-Yves & Rubise, 1991***).

En conclusion, la notion de risque donnée par les sciences des risques est étroitement liée à celle d'espace. Une approche unitaire qui met en avant le rapport entre l'espace de l'aléa et celui des enjeux exposés. Cette dimension spatiale se traduit par un rôle de plus en plus important de la carte à partir des années 70-80 (***Garry, 1996***). Dès lors, la cartographie est devenue un outil indispensable dans la prévention et l'analyse des risques naturels et technologiques, mais également dans des pratiques plus opérationnelles telles que la gestion de crise. Quoi de mieux que la carte pour rendre un risque, par définition virtuel, un peu plus tangible ?

2.1.3. La crise dans la gestion des risques naturels

D'Ercole *et al.* (***2012***) ont mis en avant l'abondance des recherches réalisées sur le thème des risques depuis près d'un demi-siècle et la part encore limitée des travaux sur la gestion de crise avant les années 90. Aujourd'hui, cette notion longtemps réservée au domaine de la sécurité civile et médicale intéresse de plus en plus de disciplines telles que la sociologie, les sciences de la communication et politiques, la géographie (***D'Ercole et al., 2012 ; Morel et al., 2006)***. La crise et sa gestion peuvent donc être abordées de différentes manières, tant le champ sémantique s'est élargi depuis près de 30 ans. En outre, la complexité croissante des territoires et l'interdépendance de nos systèmes ne cessent d'alimenter les recherches autour de la notion de crise (***Lagadec & Guilhou, 2006; Péroche, 2016***).

Qu'est-ce qu'une crise ?

Lagadec (***1991***) définit la crise comme « une perturbation qui affecte physiquement un système dans son ensemble, menace aussi les objectifs prioritaires d'une organisation et défit les comportements traditionnels et les valeurs partagées dans une organisation ». Elle aboutit à la mise en place de nouvelles pratiques, bien souvent issues de l'improvisation, mais qui sont préférables à l'application aveugle de procédures inadéquates (***Quarantelli, 1988***). La définition de Lagadec souligne le caractère processuel d'une crise dont la durée peut s'inscrire sur le long terme comme c'est le cas notamment pour les crises sanitaires (***Roux Dufort, 2005***). L'épidémie mondiale de la COVID19 en est le parfait exemple.

Pour mieux définir ce qu'est une situation de crise, Péroche (***2016***) propose sept points majeurs (Tableau 2) recensés à partir de la littérature. Lorsqu'un aléa naturel ou technologique survient, la gestion préventive devient une gestion d'urgence. En fonction du type d'aléa, les perturbations décrites par Lagadec sont plus ou moins importantes. Elles entrainent un décalage entre les mesures d'urgence habituellement employées et les difficultés rencontrées (***Péroche, 2016***). La gestion d'urgence devient ainsi une gestion de crise dès lors que les décisions et les actions menées sortent des cadres usuels de réponses. Elle oblige ainsi une gestion inédite (***Lagadec & Guilhou, 2006***) devant prendre en compte différentes formes d'incertitudes (***Reghezza-Zitt, 2019***) nées de la complexité de plusieurs facteurs qui s'imbriquent les uns aux autres (espace, acteurs, territoires, vulnérabilités) (***Hardy, 2011; Peinturier, 2020***). La situation de crise se caractérise par une dilatation spatiale et une contraction temporelle entre les dynamiques de l'événement et les décisions et actions menées par les acteurs institutionnels (***Forgues, 1993; Hermann, 1963***) . Cette dilation est d'autant plus importante si l'événement touche plusieurs territoires (***Roux Dufort, 2005***). En lien avec ces derniers points, Péroche (***2016***) soulève un autre point essentiel, l'accélération de la communication opérationnelle. Il s'agit de la montée en puissance progressive des interactions entre les acteurs et le partage d'informations cruciales à une prise de décisions efficaces. Son fonctionnement dépendant de la capacité managériale de la cellule de crise ou des cellules de crises impliquées (***Lagadec, 2002***).

Tableau 2 : Sept points majeurs définissant une crise et leurs implications

Facteurs de la crise :	**Implications :**
Décalage entre les capacités de réponses et les événements en cours	Implique que le territoire ou l'Etat ait recours à des aides extérieures
Incertitudes créées par ce décalage	Implique une gestion inédite de l'événement en dehors des cadres de référence
Dilatation spatiale	Implique que les décisions et les actions menées peuvent être moins rapides et plus limitées que les dynamiques de l'événement
Contraction du temps de la prise de décision	Implique que la prise de décisions soit plus immédiate que les délais de réflexion requis par la complexité de la situation
Accélération de la communication, de l'interaction et du partage d'informations	Implique que les informations soient fiables, cohérentes et transversales entre les acteurs impliqués
Marqueur de la construction sociale des risques	Implique une bonne communication externe des acteurs institutionnels propice au développement d'une culture du risque
Retours d'expérience	Implique un apprentissage tant sur le plan social qu'opérationnel bénéfique à la gestion d'urgence future

La crise est également révélatrice des dysfonctionnements du système de gestion des risques (***Péroche, 2016***), qu'il s'agisse des capacités de réponses à l'événement ou des mesures préventives mises en place pour éviter toute aggravation de la situation (Information préventive, mesures structurelles, organisationnelles, etc.) De fait, la crise permet un apprentissage *post*-crise aussi bien sur le plan social qu'opérationnel (***Roux-Dufort, 2010***).

Le temps des risques et de la crise :

Ainsi, la gestion d'une crise s'intègre dans un processus plus large de gestion des risques. Cette dernière se compose de quatre grandes phases : la situation normale, la pré-crise, la crise et la *post*-crise qui forment un cercle générique de la gestion des risques en France. Chacune de ces phases a pour objectif de réduire les risques et donc les conséquences d'un événement.

- **En situation normale**, la gestion des risques concerne la réduction des vulnérabilités territoriales. Elle évalue les risques (social, économique, structurel, environnemental) en amont et adopte des mesures préventives (information préventive, élaboration de plans, exercice de crise, systèmes d'alerte, moyens humains, organisationnels, techniques et matériels) pour réduire ses conséquences et en optimiser la gestion d'urgence.

- **En situation de pré-crise**, les mesures préventives sont déclenchées en anticipation d'une crise. Il s'agit de la première phase d'une gestion d'urgence. Les dispositifs enclenchés lors de cette phase évoluent en fonction de l'intensité de l'événement (en lien avec la prévisibilité de l'aléa).

- **En situation de crise**, lorsque l'aléa survient, les acteurs institutionnels coordonnent des actions de sauvegarde et de protection en fonction de l'évolution de l'événement et de son intensité. Lorsque la gestion de crise se confronte à plusieurs facteurs aggravants (la phase aigüe), les dysfonctionnements se traduisent par une catastrophe (amplification des conséquences) qui peut être vécue à plusieurs niveaux. Les mesures deviennent conservatoires. Il s'agit d'éviter une aggravation de la situation en estimant les conséquences (dommages, zone de regroupement de personnes, etc.), en priorisant les actions à des actions de recherche des personnes, de mise à l'abri et de surveillance.

  En situation de pot-crise, les acteurs institutionnels mettent en place des mesures pour rétablir les fonctions vitales du territoire. Le retour à la normale peut être plus ou moins rapide en fonction de la gravité des conséquences de la catastrophe, des aides extérieures et de la capacité de résilience des territoires. Peu après la crise s'en suit le retour d'expérience (REX) (***Leone, 2007***) où les connaissances acquises permettent l'évolution d'un état #1, d'avant cirse, à un état #2 plus adapté. Pour être efficace, ce REX repose sur l'analyse des événements survenus ayant entrainés des dommages comme ce fut le cas lors des recherches-actions *post*-Irma (***Rey et al., 2019***). La retranscription de ces événements permet de répondre aux besoins opérationnels actuels en considérant aussi les dysfonctionnements futurs en lien avec des vulnérabilités de plus en plus complexes et des changements environnements plus prégnants. De cet apprentissage, la phase préventive est alimentée et la boucle est bouclée (***Leone & Vinet, 2017***).

Le caractère processuel de la gestion crise se traduit ainsi par différentes phases synthétisées en Figure 6. La survenue d'un événement déclencheur (séisme, inondation, ouragan, etc.) s'accompagne d'une montée en puissance de la crise et de la réponse opérationnelle en parallèle. Cependant, en fonction de l'aléa et de son ampleur, la crise peut connaitre une phase aigüe, c'est-à-dire une accélération brutale causée par différents facteurs aggravants. Ceux-ci entrainent une sur-crise dont les paramètres et conséquences peuvent être ignorés par les autorités. Lorsque le pic de la crise est passé, la réponse opérationnelle entame les mesures conservatoires et de mise en sécurité. Cette phase s'accompagne d'une récolte d'informations importantes. Elle se conclut par la sortie de crise durant laquelle les autorités locales mettent en place une aide à la population et aux sinistrés. Lorsque la crise touche à son terme, les retours d'expérience sont menés et conditionnent le passage à un nouvel état (Etat #2), plus adapté.

L'approche géographique inscrit ainsi la gestion de crise dans des temporalités, des espaces et des flux bien marqués, en dehors des normalités. Cette temporalité fait référence aux différentes phases d'une crise (Figure 6). Concernant les espaces, Hardy (***2011***) considère que « *les espaces endommagés ont généré des espaces à risques où la situation d'urgence et la crise ont dû être gérées* ». D'Ercole et al. (***2012***) introduisent également « *les espaces à secourir en priorité, c'est-à-dire qui sont les plus vulnérables (en fonction de paramètres sociaux, d'exposition, d'accessibilité, politique, etc.)* » et « *les espaces ressources, c'est-à-dire ceux qui disposent de moyens matériels et décisionnels de protection, de secours et de récupération* ». Les flux représentent la réponse opérationnelle et le nombre important d'acteurs. Ces derniers se caractérisent par des individus plus ou moins connaisseurs de la gestion de crise et qui n'ont pas toujours l'habitude de travailler ensemble.

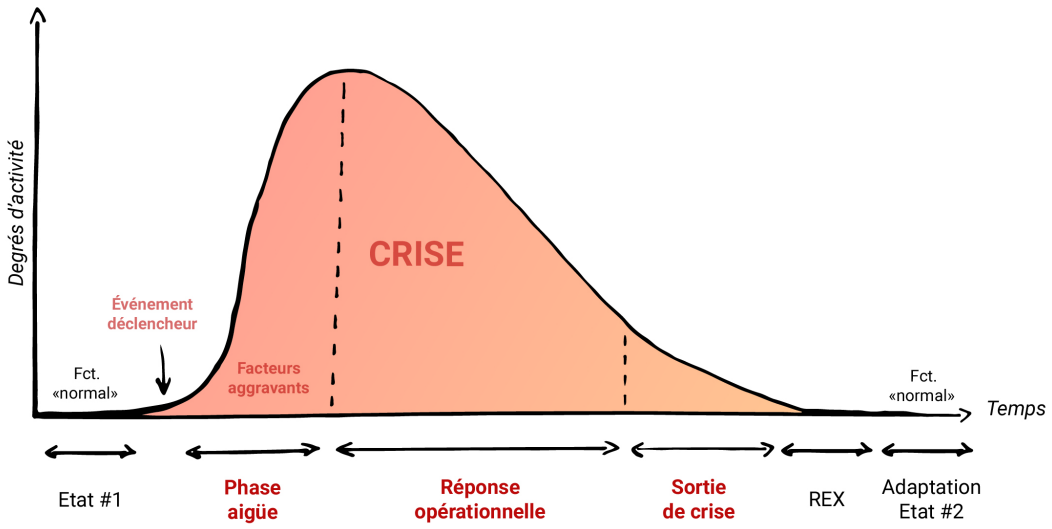


Figure 6 : Les phases de la crise (adapté de Péroche, 2016)

Tout comme pour la gestion des risques, la gestion de crise est un domaine qui mobilise l'analyse spatiale. Elle se caractérise par des incertitudes et des complexités définies par la variété des systèmes. En intégrant les notions d'espaces et de territoires, la cartographie devient un outil propice à la compréhension générale, car elle permet de relier des connaissances séparées et optimise ainsi les processus opérationnels lors de situations hors normes.

2.2. Des cartes pour gérer les risques *avant*, et les crises *pendant* et *après*

2.2.1. Les grandes familles d'usages de la carte dans la gestion des risques et des crises

La gestion territorialisée des risques s'appuie sur les représentations cartographiques pour répondre au besoin de visualiser, qualifier, quantifier les différentes composantes du risque (aléa-enjeux-vulnérabilité et résilience) ou encore promouvoir sa culture (***Girres et al., 2018***). De manière très générale, ces cartes servent à gérer les risques *a priori*, mais également *pendant* et *a posteriori* face à une chaine d'évènements survenus et à venir. En plus de leur capacité à transcrire des éléments physiques ou de modélisation de l'aléa, leur appropriation par les géographes, accompagnée bien souvent par une approche pluridisciplinaire, permet de retranscrire des informations sur la vulnérabilité des enjeux exposés (***Barroca et al., 2005; Defossez et al., 2018; Leone & Vinet, 2006***). Ainsi, la carte est utilisée à des fins diverses. Pour mieux les visualiser, Leone et al. (***2010***) donnent une classification réalisée en fonction de cinq grandes familles d'usages en gestion des risques (Tableau 3) :

- L'usage explicatif : reconstituer un phénomène naturel et ses effets
- L'usage prédictif : anticiper une situation à l'aide de scénarios
- L'usage opérationnel : anticiper et planifier les actions à mener sur le terrain en cas de crise
- L'usage informatif : sensibiliser les populations exposées
- L'usage réglementaire : limiter ou contraindre l'occupation du sol dans les zones exposées

Tableau 3 : Typologie des principales familles de cartes relatives à l'évaluation et à la gestion des risques naturels (adaptée de Leone et al., 2010)

Famille	Type de carte	Exemple	Echelle	Famille d'usage	Producteur
Carte d'aléas	Carte de localisation des phénomènes historiques	Carte de localisation des phénomènes avalancheux (CLPA)	1:25 000	Informatif et explicatif	Cemagref
	Carte de facteurs d'aléas	Carte mondiale des failles actives (carte sismotectonique)	1:25 000 000	Explicatif	Commission de la carte géologique du Monde
	Carte de susceptibilité (phénomène)	Carte de susceptibilité au retrait-gonflement des argiles	1:50 000	Informatif	Bureau des Recherches Géologiques et Minières
	Carte d'aléa probabiliste	Zonage sismique de la France	1:10 000 000	Réglementaire	Ministère de l'environnement
	Carte d'aléa déterministe	Atlas régional des zones inondables par la méthode hydrogéomorpholohique (Région Occitanie)	1:10 000 à 1:25 000	Informatif	DREAL LR
Carte d'enjeux (d'exposition)	Carte d'enjeux humains	Carte de la population communale en zone inondable en Languedoc-Roussillon (Occitanie)	1:2 500 000	Informatif	DREAL LR
	Carte d'enjeux fonctionnels	Carte de hiérarchisation fonctionnelle des éléments du système d'alimentation en eau potable de la ville de Quito (Équateur)	1:400 000	Opérationnel	Ville de Quito/IRD
	Carte d'enjeux économiques	Carte des activités économiques (entreprises) en zone inondable dans la vallée de l'Orb	1:25 000	Informatif	Syn. Mixte de la Vallée de l'Orb et Master GCRN
Cartes de vulnérabilités (propension au dommage)	Carte de facteurs physiques de vulnérabilité	Carte de vulnérabilité des hébergements touristiques en fonction de sa sensibilité aux séismes (Ville de Montréal, Canada)	1:25 000	Prédictif	Candela et al.
	Carte de facteurs humains de vulnérabilité	Carte intégrée des facteurs de vulnérabilité de la population exposée au volcan Cotopaxi (Équateur)	1:200 000	Opérationnel	Thèse R.D'Ercole (IFEA)
	Carte de facteurs fonctionnels de vulnérabilité	Carte du niveau de réduction possible de l'accessibilité du DMQ (Quito) en cas de perte des éléments clefs du réseau routier	1:400 000	Opérationnel	Thèse F.Demoraes
Cartes d'impacts (dommages constatés)	Carte d'impacts humains	Carte des victimes des cyclones en Guadeloupe	1:1 000 000	Explicatif et informatif	Leone et al.
	Carte d'impacts matériels	Cartographie rapide des dommages réalisée à la suite du tsunami de 2018 dans la province de Palu (Indonésie)	1:10 000 à 1:100 000	Explicatif et opérationnel	Copernicus EMSR
	Carte d'impacts fonctionnels (dysfonctionnements)	Carte d'impact du cyclone Irma (2017) sur le réseau de dépendances fonctionnelles des infrastructures critiques de Saint-Martin (Petites Antilles Françaises)	1:50 000	Explicatif	LAGAM (anciennement UMR-GRED)
	Carte d'impacts économiques	Carte annuelle des catastrophes naturelles les plus coûteuses dans le monde	1:50 000 000	Informatif	Munich Re
Cartes d'impacts (dommages potentiels)	Carte de risque multicritère (indices)	Carte de l'indice de risque sismique des villes méditerranéennes	1:1 000 000	Informatif et prédictif	LAGAM (anciennement UMR-GRED)
	Carte d'exposition au risque*	Carte des populations de l'arc méditerranéen français exposées au risque tsunami	1:500 000	Informatif et prédictif	LAGAM (anciennement UMR-GRED)
	Carte de pertes et de dommages potentiels**	Carte de simulation des pertes économiques liées aux destructions de résidences du Comté d'Harris (Texas, USA) en cas de cyclone	1:250 000	Informatif et prédictif	Agence fédérale des situations d'urgence (FEMA)
	Carte de dysfonctionnement potentiel**	Carte d'impact de la rupture d'une station sur l'ensemble du réseau de métro parisien	1:200 000	Opérationnel	Thèse J.F.Gleyze
Cartes mentales* **	Carte de perception des espaces menacés***	Carte de perception des zones menacées par le risque volcanique en Guadeloupe	1:400 000	Prédictif	Thèse M.Mas
	Carte de comportements potentiels***	Carte de perception des itinéraires d'évacuation privilégiés en cas de lahars sur les flancs du mont Pinatubo (Philippines)	1:40 000	Prédictif	Gaillard et al.
Cartes de prévention	Carte de maîtrise de l'occupation du sol	Zonage réglementaire de type PPR naturels	1:10 000 à 1:25 000	Réglementaire et opérationnel	Préfectures
	Carte de vigilance/alerte	Carte vigilance crue	1:10 000 000	Informatif	Ministère de l'écologie, SCHAPI
	Carte de prévision des phénomènes	Carte de prévision des trajectoires cycloniques	1:20 000 000	Informatif et opérationnel	National Hurricane Center (NOAA, USA)
	Carte de simulation des dommages****	Carte de prévision des dommages en cas de séisme	1:10 000 000	Prédictif et opérationnel	ICES foundation
	Carte d'action/évacuation	Plan des itinéraires d'évacuation en cas de tsunami	1:10 000	Opérationnel	LAGAM (anciennement UMR-GRED)
	Carte d'information préventive	Carte d'information de certains documents d'information communaux sur les risques majeurs (DICRIM)	1:25 000	Informatif	Ville de Strasbourg
	Carte des mesures/moyens de protection/prévention	Carte action de certains plans communaux de sauvegarde (PCS)	1:10 000 à 1:25 000	Opérationnel	Société RisCrises

** L'exposition au risque peut être déduite de la position des éléments exposés sur une zone d'aléa. La quantification de ces enjeux permet aussi d'en déduire le risque encouru en termes de pertes potentielles (cf. carte d'enjeux ou d'exposition)*

*** Les cartes d'impacts potentiels sont établies pour des scénarios de référence*

**** Une mauvaise perception des espaces menacés ou une mauvaise appréciation des itinéraires peuvent également être considérées comme des facteurs de vulnérabilité humaine (cf. carte de facteurs humains de vulnérabilité)*

***** La simulation des dommages (scénario) prend un caractère d'autant plus utile à l'aide à la décision lorsqu'elle est élaborée en temps réel ou à très courte échéance.*

Cette classification témoigne d'une grande variété cartographique qui répond à des objectifs différents, mais néanmoins complémentaires (***Garry, 1996***). Pour chacun de ces usages, il existe des représentations cartographiques privilégiées qui s'expriment par des choix de symbologie, d'iconographie, de sémantique, d'échelle ou encore de fonds de carte bien spécifiques.

2.2.2. Évaluer et modéliser les risques

Tout d'abord utilisée pour représenter l'imaginaire que représente la nature, la carte s'exprime aujourd'hui par des mesures, quantifications et calculs, et met en évidence l'interaction qui existe entre le risque (objet de l'étude) et son environnement (***Cornélis et Billen, 2001***). Quand il s'agit de cartographier le risque, il ne s'agit pas uniquement de représenter l'enveloppe de l'aléa. Dans leur usage prédictif, les cartes de risques découlent d'une démarche scientifique visant à quantifier les pertes potentielles et les conséquences d'un risque (***Leone, 2004***). Des scénarios sont développés à partir d'une modulation spatio-temporelle des paramètres d'aléa (emprise spatiale, occurrence, magnitude), d'enjeux (localisation, nature, présence, etc.) et de vulnérabilité. Les paramètres d'entrées sont alimentés à partir des banques de données historiques, géographiques et modélisés à l'aide de méthodes de calcul et d'outils tels que les systèmes d'information géographique.

Selon Rejeski (***1993***), ces modélisations et représentations cartographiques se placent au centre de la science des risques. Elles font l'interface entre trois cultures du risque qui se fondent sur les préoccupations scientifiques, décisionnelles et publiques. Elles sont synthétisées dans la Figure 7 suivante.

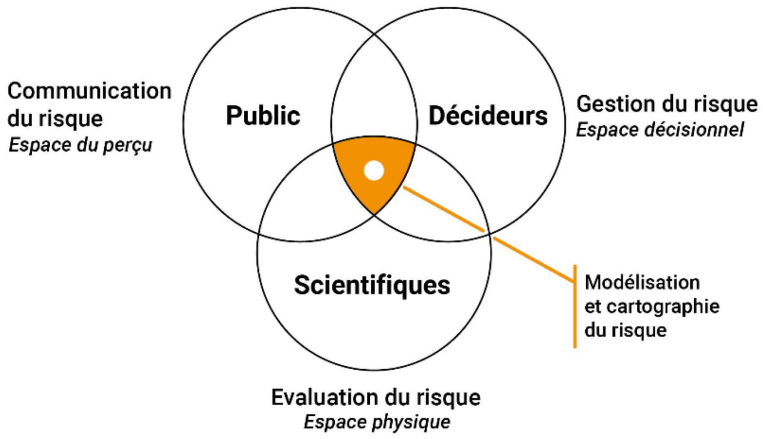


Figure 7 : Les trois cultures du risque (d'après Rejeski, 1993)

La carte est ainsi un objet de partage des connaissances entre l'expertise, l'action, le contrôle et l'information. Ses usages peuvent basculer en fonction des utilisateurs, mais également du besoin : de la prévention à la gestion.

2.2.3. *Reconstituer et alimenter les retours d'expérience*

La carte peut être employée pour reconstituer un phénomène et ses effets (usage explicatif). Cette reconstitution entreprend le croisement des relevés de terrain tels que les changements paysagers (traces géomorphologiques, dégâts sur les bâtiments, les infrastructures, etc.) ou encore les témoignages écrits ou oraux de la population, afin de spatialiser et d'évaluer l'étendue des conséquences d'une catastrophe. Ce type de carte est alors principalement utilisé à des fins scientifiques comme support de retour d'expérience et en appui aux stratégies futures de gestion des risques et des catastrophes.

A titre d'exemple, l'éruption de la Montagne Pelée (Martinique) du 8 mai 1902 a fait l'objet de travaux pionniers dans la reconstitution d'une catastrophe (***Lacroix, 1904***). Cette dernière s'appuie notamment sur le témoignage des circonstances de l'éruption du capitaine Freeman, un des rares navires à avoir pu quitter Saint-Pierre avant l'éruption (***Benitez, 2019***) ainsi que sur les nombreux clichés illustrant les destructions et le phénomène de la nuée ardente, et les données de terrain recueillies par Lacroix (***1904***) (Figure 8).

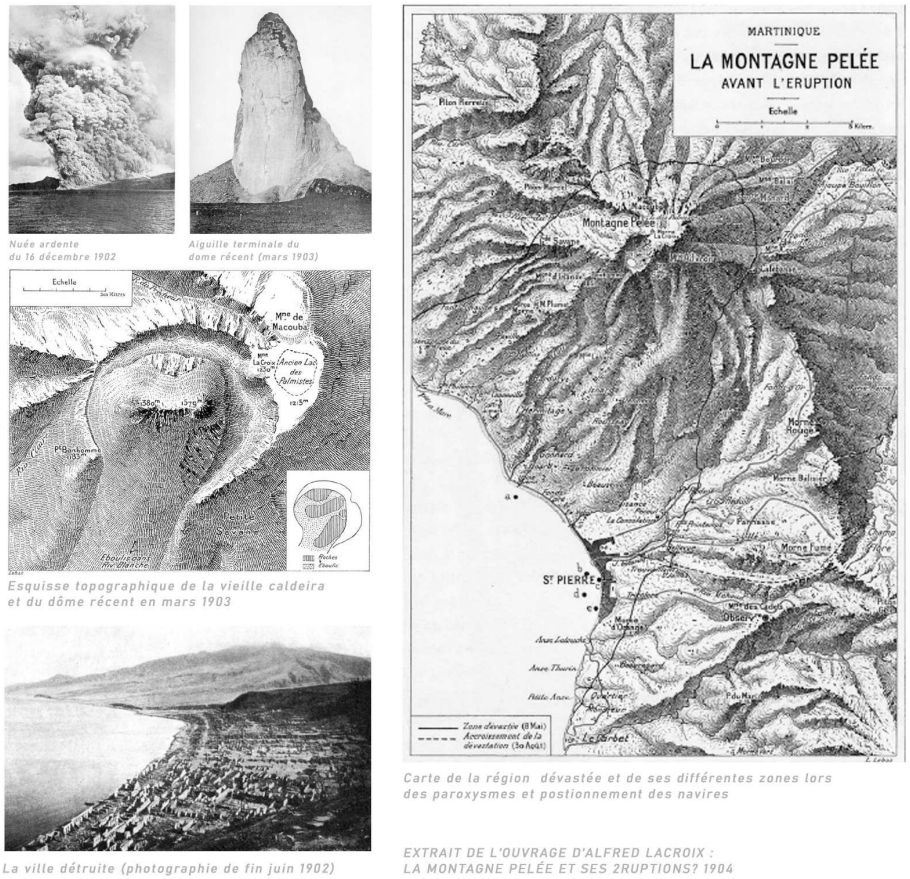


Figure 8 : Extrait des cartes et clichés servant à la reconstitution de l'éruption de la Montagne Pelée de 1902 en Martinique (Lacroix, 1904)

Plus largement, la reconstitution d'un événement intègre d'autres éléments que ceux de l'aléa (chronologie des événements, phénomènes physiques, etc.) et qui sont liés aux aspects socioculturels (réponse des populations, facteurs ethniques, dommages aux bâtiments, conséquences économiques et fonctionnelles, etc.) et environnementaux (modification paysagère, occupation du sol, etc.) (***Lavigne,***

2016). Le croisement de ces différents aspects alimente les retours d'expériences et est déterminant dans la trajectoire que prend le relèvement des territoires à la suite d'une catastrophe. La compréhension des événements passe par des échelles spatiales variées allant de la localité à la région touchée. Elles s'étendent encore plus loin pour les phénomènes paroxystiques tels que les tsunamis, les grandes éruptions volcaniques et cyclones. Selon l'échelle choisie, les relevés de terrain permettent la réalisation de cartographies détaillées des dommages et des processus d'endommagement. Ces cartes enrichissent la connaissance des mécanismes du phénomène et de ses effets (*Leone et al., 2007*). Ce faisant, elles alimentent les usages prédictifs et réglementaires que l'on retrouve dans la gestion des risques, notamment dans l'aménagement des territoires (*Lahousse & Salvador, 1998*).

2.2.4. *Contrôler et réglementer l'occupation du sol*

Les cartes d'aléas, produit de la modélisation et de l'expertise, expriment les niveaux de menaces potentielles. Une caractéristique qui entraine parfois leur dénomination abusive de cartes de risque (*Leone, 2004*). Elles ont principalement des fonctions réglementaires ou informatives qui concernent « l'aménagement » du territoire en fonction d'un type de « risque ». La relation de ces deux notions est abordée à partir des années 80 (*Lippmann, 1982*) et l'aménagement y est alors vu comme la prise en compte de l'influence des processus naturels sur la structure urbaine (*Morel et al., 2006*). Avec les sociétés modernes, la préoccupation de l'aménagement face au risque est grandissante et la loi Barnier (loi du 5 octobre 1995) vient instituer cette réalité. C'est le cas en France, où l'enveloppe d'inondabilité, les zones sismiques ou encore les zones de glissement de terrain sont transcrites dans des Plans de Prévention des Risques (PPR) (Figure 9). Ces derniers, par l'usage d'un codage spécifique, prescrivent des normes de construction obligatoires aux collectivités territoriales. Ces plans ont pour objectif de favoriser une action avant la catastrophe, en limitant les conséquences dommageables par la réduction de l'exposition des biens et des personnes (*Douvinet et al., 2011*).

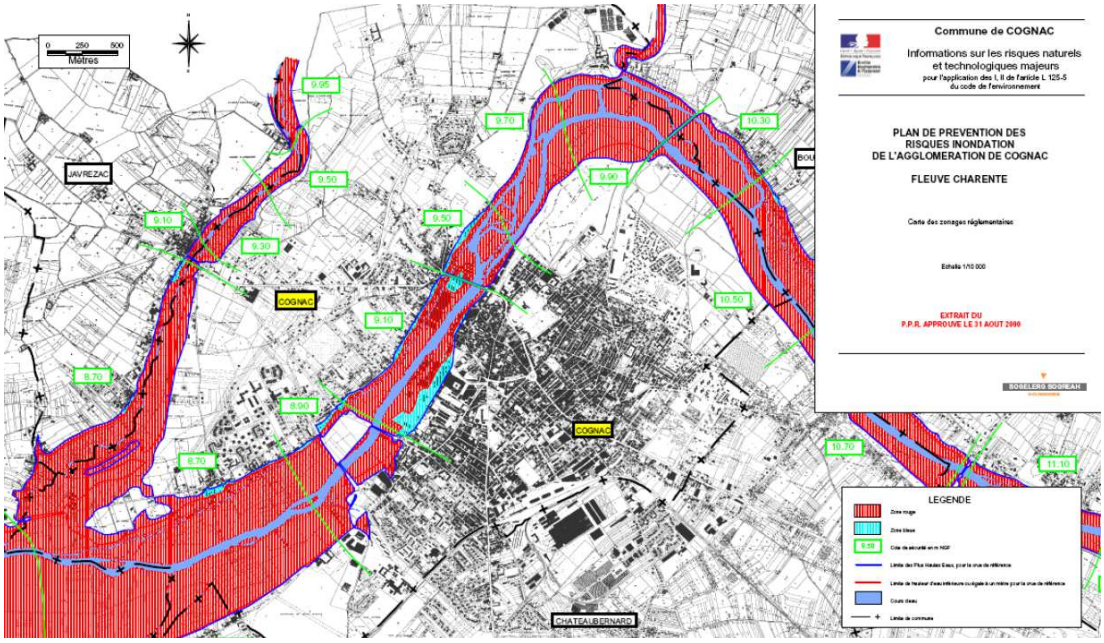


Figure 9 : Plan de prévention des risques inondation (PPRI Cognac, 2000) (zonage réglementaire)

Avec la loi dite Bachelot-Narquin du 30 juillet 2003, les PPR intègrent également les risques technologiques. L'objectif est d'avoir une approche plus globale et multirisque à l'échelle de l'espace à risque. Les cartes produites sont généralement réalisées à l'échelle 1 : 25 000, étendue au 1 : 10 000 et 1 : 5 000 puis annexées dans les Plans locaux d'Urbanisme (PLU) (***Chesneau, 2006***).

2.2.5. Informer et sensibiliser les populations

Le risque touchant un territoire, il est important d'informer et de sensibiliser sa population et ses différents acteurs (publics et privés). Chesneau (***2006***) parle de deux niveaux d'information à représenter sous la forme cartographique : l'information générale et l'information préventive. Elle présente l'information générale comme les connaissances « au sens large » sur les risques majeurs. Généralement, les cartes produites sont réalisées à très petites échelles voire à une échelle nationale et reprennent les cartographies de l'aléa (Figure 10).

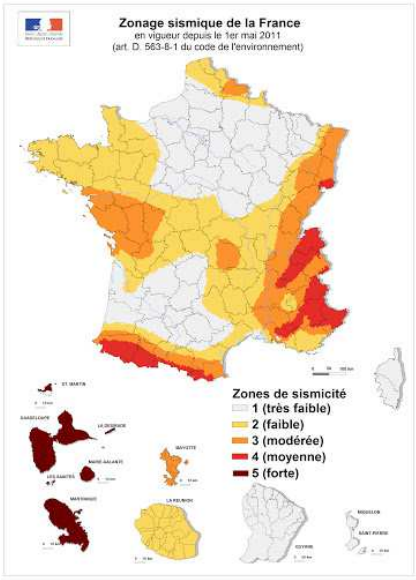


Figure 10 : Carte des zones sismiques de la France (plan séisme, 2015)

L'objectif d'une information générale est de favoriser la mémoire d'un risque qui n'est pas conservée de manière rationnelle (***Givone, 1998***). Les décideurs locaux (Maire et élus) utilisent cette information générale afin développer l'information préventive au sein de leur territoire. Cette dernière est instaurée par la loi de 1987 qui donne le droit au citoyen d'avoir accès à des informations sur les risques recensés sur son lieu de vie. Elle répond à l'objectif de créer et pérenniser une culture du risque à l'échelon de l'individu en favorisant les bons comportements et en diminuant la vulnérabilité des biens et des personnes. Cette information préventive est affichée dans des documents tels que les Documents d'Information Communale sur les Risques Majeurs (DICRIM). Mis à disposition de tous les citoyens, ces documents contiennent bien souvent des cartes servant à sensibiliser et à se localiser vis-à-vis de l'aléa (Figure 11). Ils peuvent être alimentés par des données historiques, des témoignages, des modélisations ou encore des retours d'expérience.

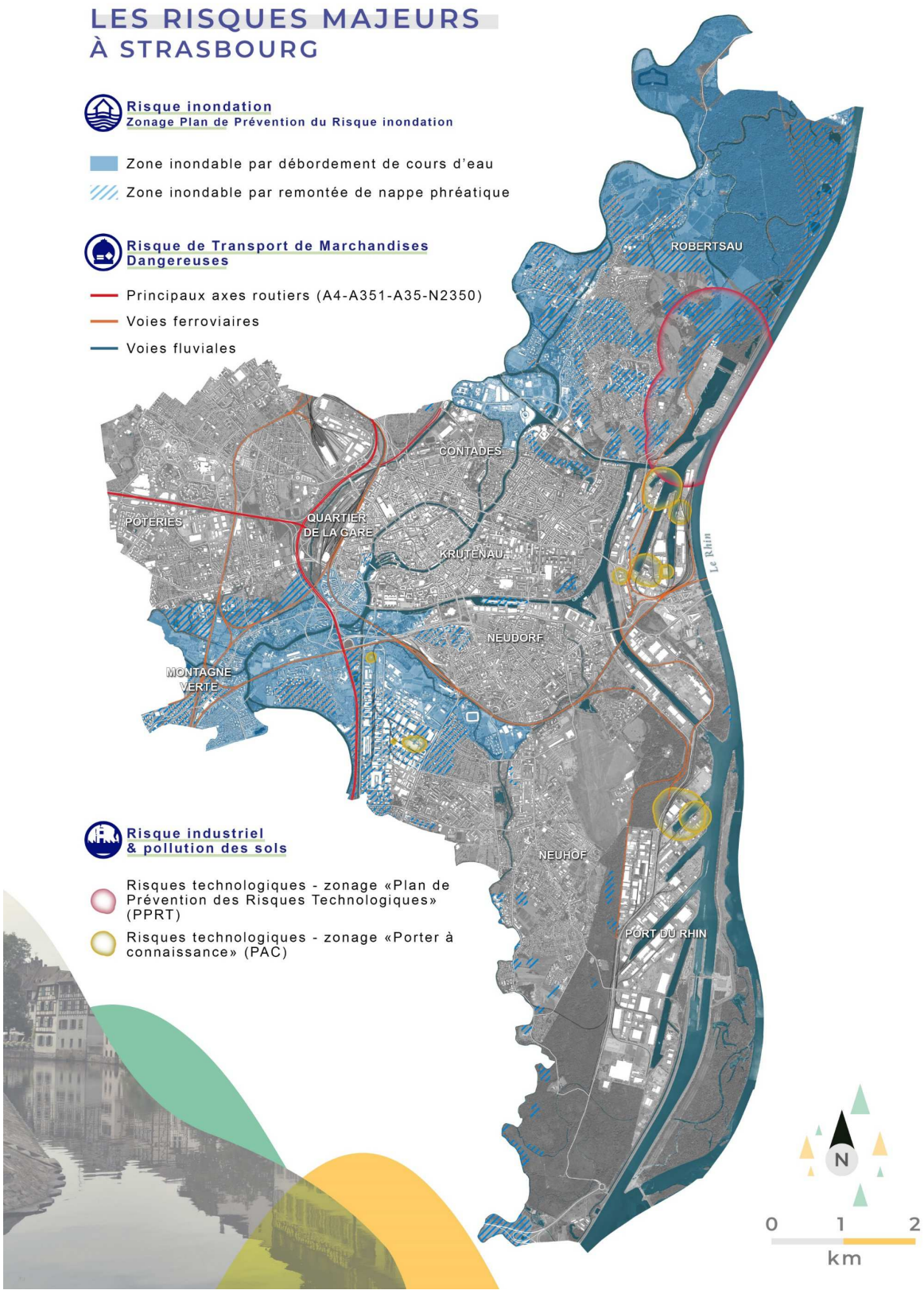


Figure 11 : Carte des risques majeurs du DICRIM la ville de Strasbourg (RisCrises, 2019)

2.2.6. *Anticiper et planifier les actions*

Grâce à ses capacités de croisement des informations, la carte permet une représentation synthétique et fonctionnelle de l'espace. Elle consiste en « *une hiérarchisation des risques dans l'espace pour adapter, dans le temps et l'espace, les moyens de prévention et d'intervention* » (***Propeck-Zimmermann et al., 2002***). La carte est donc un outil de travail et d'aide à la décision pour les acteurs du risque qui aménagent le territoire en anticipation d'un phénomène et interviennent sur le terrain lorsqu'un événement a lieu (***Chesneau, 2006***).

L'usage de la carte *a priori*

A priori, la carte est utilisée dans une stratégie de prévention. Elle aide à l'aménagement du territoire afin de réduire les risques (construction de digues, placement des éléments opérationnels, etc.). Elle permet également d'anticiper la localisation des enjeux sensibles et vulnérables à évacuer, protéger, etc. C'est par exemple le cas des cartes d'évacuation tsunami réalisées dans le cadre des travaux de recherche du LAGAM (ex. UMR GRED) (Figure *12*). Grâce à la synthèse d'une expertise poussée sur l'aléa et les composantes territoriales (altitude, accessibilité, capacité d'accueil des sites refuges, zone de danger à évacuer) ces cartes servent de support à la planification et sont un appui à la décision pour les communes exposées au risque (***Péroche, 2016***). Elles sont complémentaires des mesures prises dans le cadre des Plan Communal de Sauvegarde (PCS) et permettent optimiser le balisage des itinéraires d'évacuation sur le terrain (***Leone et al., 2014***).

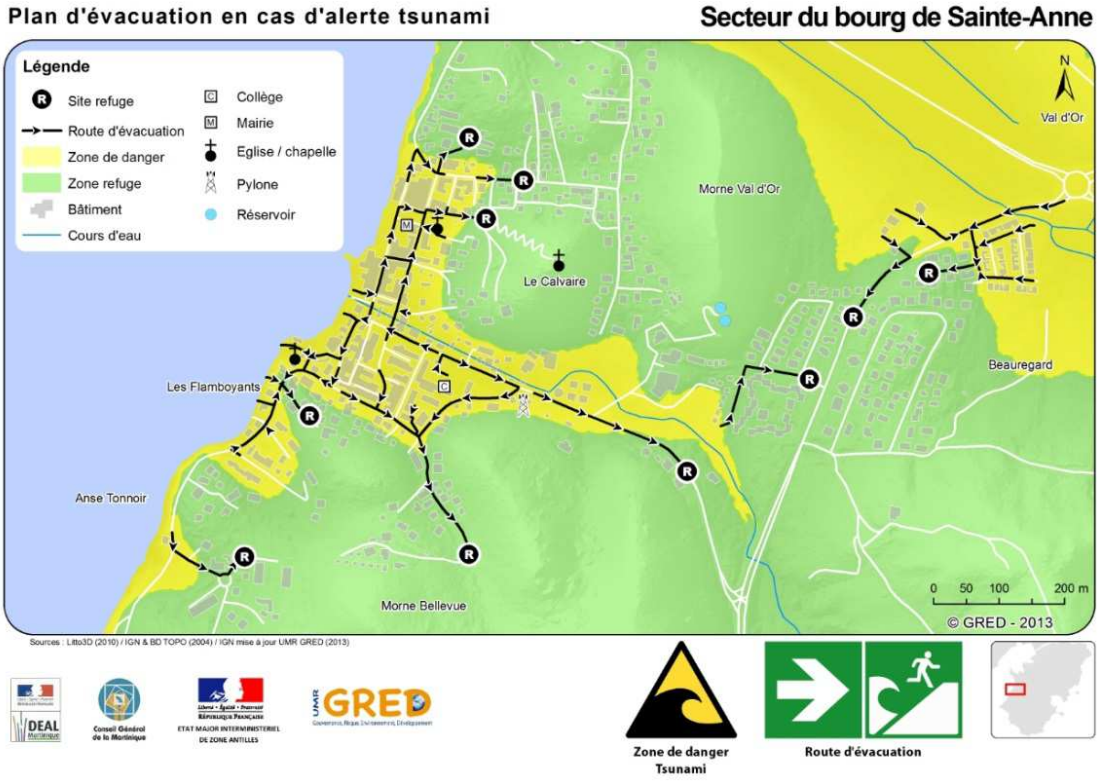


Figure 12 : Extrait du plan d'évacuation en cas de tsunami (UMR-GRED, 2014)

L'usage de la carte *pendant*

Pendant une gestion de crise, la communication (au sens large) est constituée de deux champs d'action. Il s'agit d'une part de la communication « externe » qui renvoie aux informations et l'image que l'on diffuse aux médias (***Libaert et al., 2018***) et d'autre part la communication « opérationnelle ». Dans les processus de décisions, cette communication « opérationnelle » est une composante importante de la transmission des informations, du développement des connaissances, du jugement (***Cai et al., 2006; Saoutal et al., 2014***) et de la coordination des actions à mener pour réduire les conséquences directes de l'événement. Dans ce contexte, la carte a une place particulière en permettant la communication d'informations spatiales, thématiques et temporelles (***Altan et al., 2010; Konecny et al., 2010***). Pour appuyer la communication verbale avec ses équipes de terrain et les autres intervenants, le gestionnaire de crise ou l'opérateur se basent partiellement sur la perception visuelle d'informations cartographiques permettant la création de nouvelles connaissances situationnelles (***Staněk et al., 2010***). Pour ce faire, la carte regroupe les éléments opérationnels, les enjeux sensibles (humains et structurels) exposés et les moyens d'accessibilités et si possible leur état de fonctionnement (***Chesneau, 2006***). Elle est utilisée principalement par la Sécurité Civile mais sert également aux décideurs locaux dans le cadre de la gestion de crise communale lors de l'activation du Plan Communal de Sauvegarde (PCS).

En France, le PCS apparait avec la loi de modernisation de la Sécurité Civile de 2004. Document obligatoire pour les communes soumises à PPR, son application s'étend depuis 2010 aux communes ne disposant pas encore de PPR, mais néanmoins soumises à un risque connu (*article D.563-8-1 du code de l'environnement).* Il assure l'opérationnalité d'acteurs bien souvent non spécialiste de la gestion de crise. Le but étant de former les acteurs à la crise et de développer le concept de « *risk manager* » du territoire (***Donze, 2007***). Il prévoit entre autres des mesures préventives comme la définition des itinéraires d'évacuation, des zones d'accueil et d'hébergement des populations déplacées. Mais le PCS sert également à la réalisation de mesures plus actives telles que le contrôle des axes de communication, l'appui des forces de secours, la logistique ou encore l'alerte des populations exposées. Les cartes contiennent au mieux des informations sur l'aléa, les enjeux exposés (populations, équipements publics, infrastructures critiques, etc.), les éléments opérationnels, les points de contrôle et actions à mener sur le terrain en fonction de l'évolution de l'événement (Figure 13). Elles sont réalisées aux échelles 1 : 25 000 voire 1 : 5 000 pour les besoins d'intervention sur le terrain.

Ces cartes sont produites en interne par les services communaux, par les services de protection civile, mais également par des prestataires privés spécialisés dans le domaine de la gestion des risques et des crises. Avec le développement des SIG et des outils informatiques, certaines grandes villes disposent aujourd'hui de plateformes de modélisation permettant de suivre l'événement en temps réel. C'est par exemple le cas du système ESPADA qui utilise des données hydrométéorologiques pour réaliser des prévisions hydrologiques et estimer le scénario d'aléa le plus probable puis, le scénario de risque auquel est rattaché un système d'alerte à la cellule de crise (***Peyron et al., 2007***).

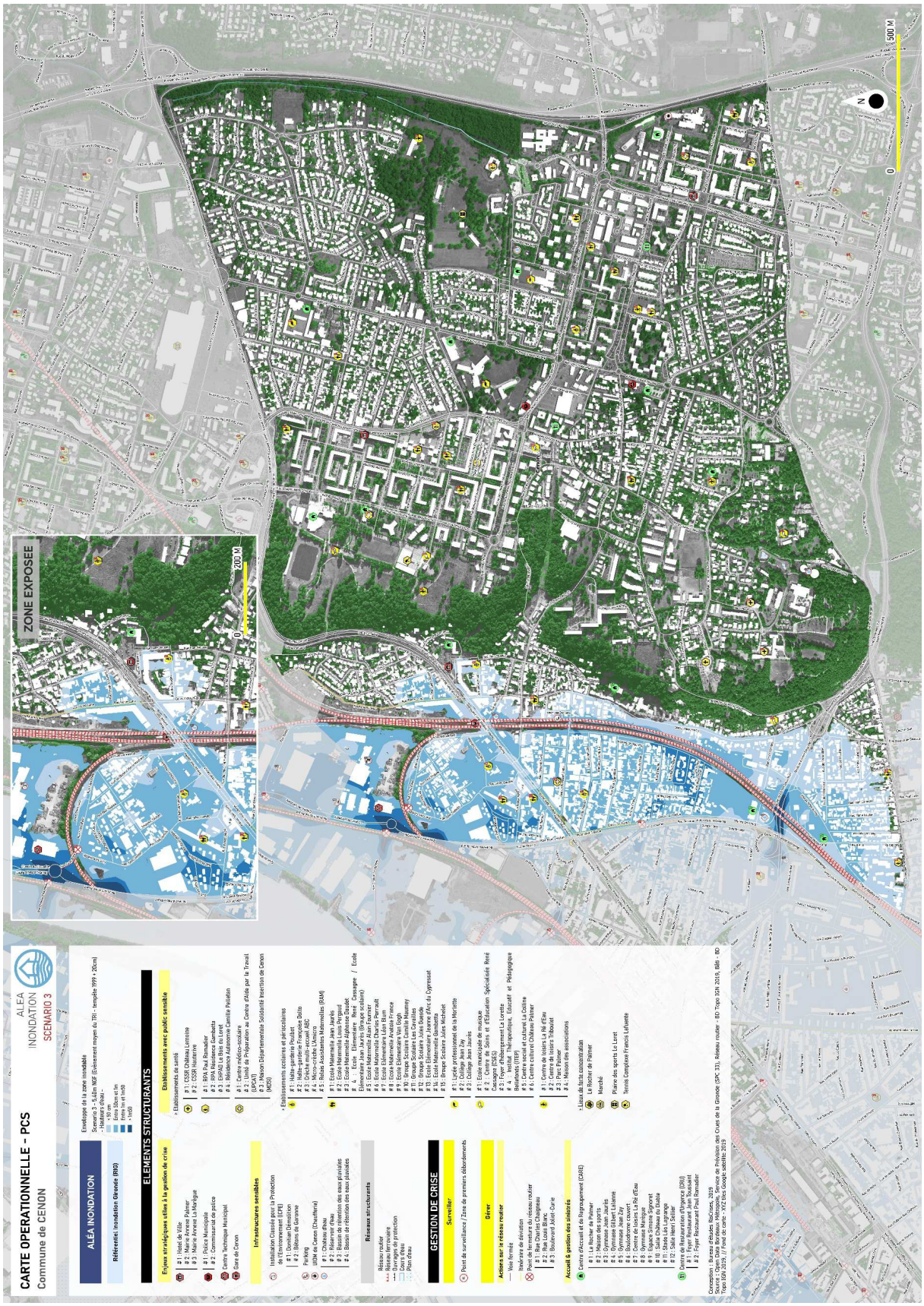


Figure 13 : Cartographie opérationnelle du PCS de la commune de Cenon (RisCrises, 2020)

L'usage de la carte *a posteriori*

Comme nous avons pu le voir en amont, les cartes réalisées après un événement servent à la construction des retours d'expérience, notamment par la reconstitution des phénomènes et de leurs conséquences. *A posteriori*, ce type de cartes sert à localiser les dégâts engendrés sur les bâtiments, infrastructures, populations, l'environnement avec un gradient d'intensité. Ces cartes d'impact réalisent la synthèse d'une catastrophe par le croisement des données de terrain. Ces procédés peuvent être chronophages surtout pour les événements de grandes ampleurs. Cependant, depuis quelques années maintenant, la cartographie d'impact a grandement évolué et s'est enrichie de nouveaux contenus dont les usages servent à la fois aux scientifiques, mais également aux décideurs et aux assureurs. Cette évolution a été amenée par les technologies d'Observation de la Terre (OT) qui ont redéfini les capacités d'analyse (notamment vis-à-vis des échelles d'intervention), les délais d'acquisition des données et de productions cartographiques. Ces cartes constituent dès lors un outil de gestion de crise à court et moyen terme pour les acteurs du risque. C'est par exemple le cas des cartographies rapides des dommages *post*-catastrophes offrant une restitution des dommages à plusieurs échelles, de la localité à la région (Figure 14) et que nous détaillerons dans la section suivante. À bien des égards, les cartes *a posteriori* peuvent enrichir les cartographies opérationnelles telles que le PCS, en intégrant notamment les retours d'expérience passés aux mécanismes de sauvegarde des populations (évacuation des quartiers ayant été sinistrés lors du dernier événement, axes routiers touchés, etc.). Elles sont également un outil d'information utilisé par exemple par les acteurs de l'aide humanitaire.



Figure 14 : Cartographie « d'impact » du passage du cyclone Irma à Saint-Jean Bay, Saint Barthélemy -France (SERTIT, 2017)

Chapitre 3 : La cartographie des dommages *post*-catastrophes

3.1. Origine de la cartographie des dommages *post*-catastrophes

3.1.1. Mise en place d'une réponse internationale aux catastrophes

La mise en place d'un dispositif international

L'ampleur des catastrophes, leur fréquence et leur impact sur les sociétés croissent en même temps que l'exposition des personnes et des biens en zone à risque. Les événements récents tels que les cyclones Irma (2017) et Dorian (2019) dans les Caraïbes ou encore le tsunami qui toucha Palu à la suite du séisme de Célèbes (2018) démontrent deux choses. La première, que les catastrophes sont variées et qu'elles peuvent se cumuler, augmentant ainsi l'intensité de l'événement et toucher de vastes territoires. La seconde, que les événements touchent aussi bien les sociétés développées que les sociétés en développement bien que ces derniers soient plus souvent touchés au regard de l'occurrence des catastrophes naturelles (Figure 15). La gestion de tels événements a pour conséquence une hausse de la demande d'informations précises, rapidement disponibles et plus actuelles (***Voigt et al., 2007***).

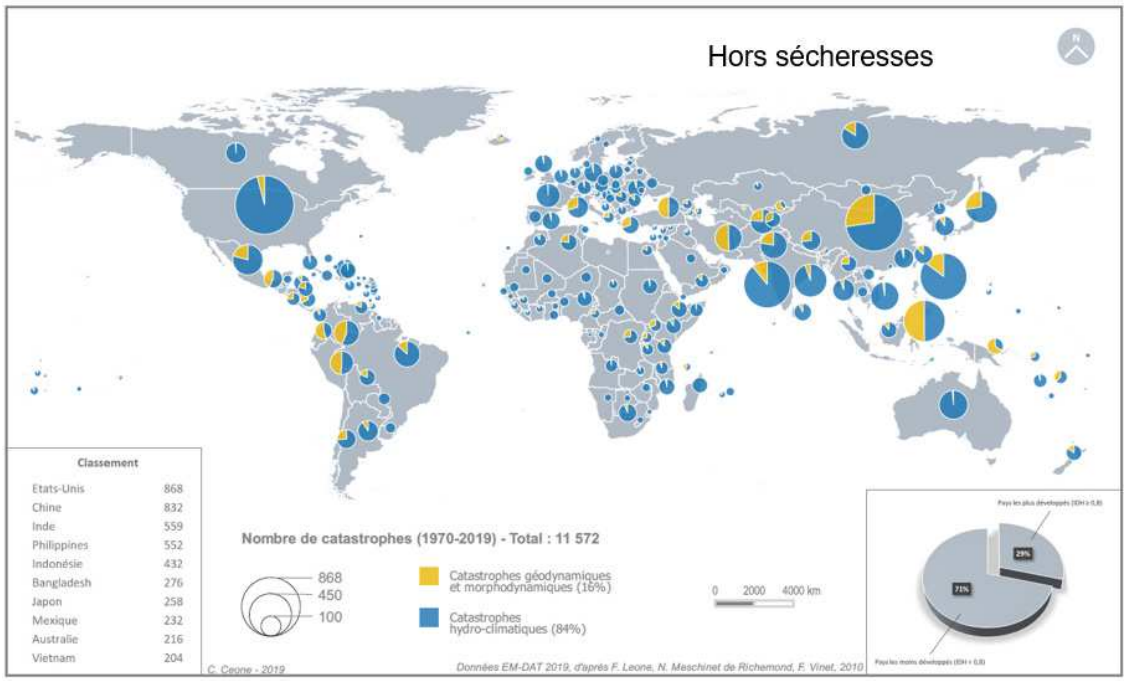


Figure 15 : Occurrence des catastrophes naturelles à cinétique rapide entre 1970 et2019 (d'après Leone et al. 2010, Ceone, 2019)

C'est dans ce contexte qu'interviennent les technologies d'Observation de la Terre. Cependant, il est bon de noter que l'utilisation de l'imagerie spatiale à des fins de caractérisation des catastrophes naturelles et des dommages n'est pas si récente (***Andre et al., 2001***). La résolution 41-65 des Nations Unies (ONU) en pose d'ailleurs les fondements en décembre 1986 (***Girard & Girard, 2010***). Cette dernière visait à intensifier les efforts liés aux problématiques des risques par l'intermédiaire des principes de télédétection. Quelques années plus tard, en 1999, la Charte internationale « Espace et

Catastrophes Majeures » (CECM[11] abrégée dans ce manuscrit par : la CHARTE) est créée à l'initiative des agences spatiales du CNES (Centre National des Études spatiales), de l'ESA (Agence Spatiale Européenne) et de la CSA (Agence Spatiale Canadienne). Elle est signée lors de la conférence UNISPACE III organisée par les Nations Unies à Vienne (***Klett, 2011***). Elle permet aux utilisateurs autorisés (états, protections civiles et scientifiques), touchés par une catastrophe, de bénéficier gratuitement d'images satellites sur demande par le moyen d'opérateurs dédiés à leur acquisition (***Stevens, 2008***). Cette collaboration internationale est composée de 17 membres actifs (agences spatiales) disposant de 61 satellites contributeurs (systèmes optiques et plateformes radar). À titre indicatif, depuis 2000, la CHARTE a été déclenchée près de 700 fois avec une forte augmentation de ses activations depuis 2007. Aujourd'hui, la CHARTE collabore avec d'autres initiatives régionales fournissant des services de surveillance des catastrophes. C'est par exemple le cas du Centre National de réduction des Catastrophes de Chine (NDRCC) qui intervient en Chine (***Voigt et al., 2016***). L'initiative Sentinel Asia (SA) établie en 2005 par la collaboration entre les agences spatiales et les agences de gestion des catastrophes, connue sous l'acronyme de APRSAF (*Asia-Pacific Regional Space Agency Forum*), couvre l'Asie et le Pacifique (***Lang et al., 2017***). Les territoires d'Afrique, du Proche-Orient, d'Amérique centrale, du Sud et les Caraïbes bénéficient des activités de l'UNOSAT, opérationnel depuis 2003 (***Lang et al., 2019***).

En Europe, le service EMS de Copernicus[12] (anciennement GMES), géré par le JRC (*Joint Research Centre)* de la Commission européenne joue également un rôle de plus en plus important. Ce service est officiellement lancé en 2008 et pleinement opérationnel en 2012. Ainsi, la CHARTE joue un rôle international, notamment en faisant la promotion d'une coopération des agences spatiales dans la gestion des catastrophes majeures (***Lang et al., 2019***).

La cartographie rapide en appui à la gestion de crise

Ainsi, l'imagerie spatiale est utilisée depuis près de vingt ans afin d'appuyer la réponse opérationnelle aux situations de crise (***Voigt et al., 2016***), en offrant un support technique et informatif, sur l'étendue et les conséquences d'une catastrophe (***Bessis et al., 2004; Yésou,et al., 2015a***). Les données récoltées à partir de l'acquisition satellitaire sont donc utiles aux gouvernements n'ayant pas recours aux moyens d'investigations de terrain classiques et/ou qui sont mal dotés en informations géographiques sur leurs territoires. Ces données prennent la forme de cartographies d'urgence par satellite (SEM) (***Voigt et al., 2007***) ou d'informations géospatiales (***Lang et al., 2019***) afin de soutenir la prise de décisions dans les opérations et les activités de secours (***Stevens, 2008; Voigt et al., 2007***), notamment lors d'événement de grande ampleur (***Ogawa & Yamazaki, 2000***). Le service Copernicus EMS, quant à lui, est à l'origine de plus de 4 500 produits cartographiques depuis 2012 (***Battiston et al., 2019***). Cette forte implication s'explique par l'efficacité à la fois spatiale et temporelle de ses services.

[11] https://disasterscharter.org/web/guest/home;jsessionid=23BFF002758E8876EBF720A7259F3D99.jvm1
[12] https://emergency.copernicus.eu/

Aussi, les cartes produites possèdent des rôles bien spécifiques pouvant être classés en quatre grandes catégories : les cartes de référence, d'extension de l'événement, d'intensité et d'impact.

- Les cartes de référence ou cartes de localisation sont les premiers supports cartographiques à disposition après activation des services d'OT. Elles exploitent les images satellites les plus récentes contenues dans les banques de données spatiales afin de fournir un aperçu de la zone touchée. Elles se composent d'informations thématiques comme les enjeux (humains, structurels, etc.), l'occupation du sol, le relief, etc., et comportent des toponymes. Elles sont particulièrement utiles pour les zones géographiques dépourvues de cartes topographiques récentes. On peut citer des exemples comme les cartes de références de Haïti réalisées à la suite du séisme de février 2010 ou plus récemment la carte produite dans la région de Batangas en Indonésie après l'éruption du volcan Taal au mois de janvier 2020.
- Les cartes d'extension de l'événement permettent de distinguer les zones affectées et les zones non affectées par l'événement. Elles offrent une vision synoptique de la catastrophe utile au dimensionnement des moyens d'intervention.
- Les cartes d'intensité ont pour objectif de répondre à la question des zones les plus affectées par l'événement. Elles offrent également le moyen d'identifier les zones les moins touchées qui seront utiles pour les gestionnaires de crise en charge du déploiement des moyens.
- Les cartes d'impact ou d'évaluation des dommages sont généralement produites dans les jours qui suivent un déclenchement des services d'OT. Elles décrivent l'étendue de la catastrophe par l'intermédiaire d'une évaluation des dommages aux bâtiments, aux voies de communication, etc. Elles permettent également d'afficher la localisation des abris et zones de regroupement potentiels (***Kerle & Widartono, 2008***).

L'évaluation des dommages est un aspect central de la réponse d'urgence proposée par les services de cartographie rapide (***Dell'Acqua & Gamba, 2012; Eguchi et al., 2009***). De fait, les cartes d'intensité et d'impact sont particulièrement utiles au dimensionnement de la réponse opérationnelle qui accompagne la phase de crise et de *post*-crise. L'implication de ces dix dernières années montre à quel point ces produits sont utiles afin d'appuyer la gestion de crise (Figure 16), sans toutefois accuser d'un retour concret de leur appropriation réelle sur le terrain. Les activations de la CHARTE et de Copernicus EMS lors d'événements comme le séisme de Haïti (2010), le cyclone Irma (2017) ou encore le tsunami de Palu (2018) ont offert un appui à la réponse opérationnelle grâce à l'état des lieux des dommages constatés à plusieurs échelles : très localisée (quartier, localité), intermédiaire (ville, arrondissement), assez vaste (île, région). Ces données servent également à la construction de retours d'expériences utiles à la compréhension des vulnérabilités et à l'adaptation du territoire et à son aménagement. Dans certaines mesures, lorsque la catastrophe dépasse les événements de référence, comme cela peut être le cas pour les enveloppes d'inondations servant à la mise en place des Plan de Prévention des Risques, les données récoltées sur l'extension du phénomène servent à la mise à jour ou à la création de cartes réglementaires.

Ce fut le cas récemment pour Saint-Martin[13] à la suite du cyclone Irma (saison cyclonique de 2017) dont l'ampleur sans précédent a entrainé une modification de la carte d'aléa et donc des réglementations en vigueur.

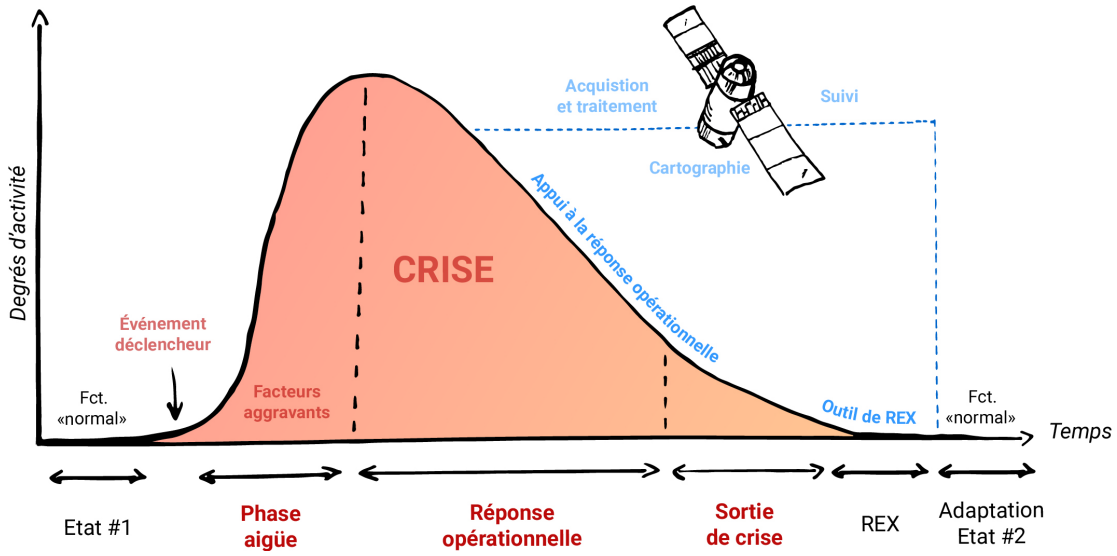


Figure 16 : Intégration des technologies d'Observation de la Terre dans les phases de la gestion de crise

La diffusion des produits de cartographie rapide

La diffusion est la dernière étape du processus d'intégration de ces produits. Pour cela, on fait appel à un panel de possibilités offertes par les nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC). Les cartes sont principalement distribuées sous formats numériques. Elles sont communiquées au moyen de courriels, ou téléchargeables sur des plateformes internet dédiées ou via des File Transfer Protocol (FTP). Elles sont généralement accompagnées de données géoréférencées, exploitables sous SIG, permettant à l'utilisateur de les décliner en fonction de ses besoins. Ces cartes de crise sont distribuées, par l'intermédiaire d'utilisateurs autorisés, aux nombreux acteurs impliqués dans la gestion de crise (***Stevens, 2008***). Ce faisant, elles ont pour objectif de faciliter le partage d'informations entre les décideurs des différents maillons de la gestion de crise, mais également avec les aides extérieures (***Voigt et al., 2005***). Par ailleurs, si pour le moment les services de sécurité civile et les autorités nationales, comme le centre opérationnel de gestion interministérielle des crises (COGIC) en France, sont encore les principaux utilisateurs de ces cartographies d'urgence, d'autres acteurs, tels que les acteurs locaux (entités publiques locales, régionales) ou internationaux (organisations internationales, ONG) et acteurs privés (assurances), sont amenés à intégrer cette technologie dans leurs stratégies et plans d'action, notamment dans les autres phases du risque (prévention, crise, reconstruction)(***Battiston et al., 2019; Voigt et al., 2016***). Cela a notamment été le cas après le séisme et le tsunami de 2011 au Japon (Tohoku-Oki), où les données et les cartes produites par les services de cartographies rapides ont contribué aux efforts des institutions locales afin de soutenir les activités de

[13] Carte actualisée de l'aléa cyclonique du PPRN en vigueur sur l'île de Saint-Martin : *http://www.com-saint-martin.fr/ressources/Carte-actualisee-de-l-alea-cyclonique-du-plan-de-prevention-des-risques-naturels-PPRN.PDF*

secours (**Voigt et al., 2016**). En France, les cartographies d'extension maximale des inondations de 2018 de la région Grand-Est ont été diffusées à la DREAL, aux DDT et SPC de la région Grand-Est afin d'appuyer le relèvement du territoire (**Battiston et al., 2019**). Les assurances sont également utilisateurs des données produites par les services de cartographies rapides. L'évaluation des dommages après le passage de l'ouragan Irma à Saint-Martin en 2017, disponible rapidement, a fourni à ces acteurs une première estimation du montant des indemnités.

La démocratisation progressive de ces produits motive d'autant plus l'objet de notre recherche qu'elle aura tendance à en diversifier le type d'usager, les connaissances et les capacités d'interprétations cartographiques.

3.2. Du spatial à la construction d'une information géographique

3.2.1. L'acquisition et le traitement des données satellitaires

Ces services de cartographie rapide interviennent en situation d'urgence et sont utiles aux gestionnaires de crise et aux opérations de terrain (**Stevens, 2008**). Leur objectif est donc de fournir en très peu de temps une information géographique dérivée des données brutes satellitaires. Pour le service Copernicus EMS, les délais d'acquisition sont réduits grâce à la couverture et à la fréquence de passage des satellites Sentinel et Pléiades (**Yésou et al., 2015b**). Le nombre important des satellites opérationnels permet d'obtenir des images régulières en quelques heures, de jours comme de nuit, avec une précision de l'ordre de la dizaine de centimètres (**Battiston et al., 2019**). *A contrario*, les délais des cycles « normaux » s'estiment en semaine et en mois (**Girard et Girard, 2010**) et leurs images sont utilisées principalement pour le suivi *post*-événement. Parmi les informations principales produites par ces services, on retrouve les dommages. En fonction du degré de précision des images satellites, les dommages sont détaillés aux bâtiments, réseaux et infrastructures critiques. Pour obtenir ces informations, ces services s'appuient sur les données brutes satellitaires qui intègrent l'imagerie radar, optique, etc. Ils exploitent ces données à travers deux types de traitements suivants.

Les traitements automatiques et semi-automatiques

Les traitements automatiques se basent sur l'analyse multi-temporelle et la détection des changements des données recueillies par les images pré-catastrophe (**Pesaresi et al., 2007**) et *post*-catastrophe (**Molch, 2010**). Pour cela, les processus intègrent les variations de réflectance et/ou les changements de morphologie des bâtiments (**Matsuoka et Yamazaki, 2000; Tralli, 2000**) en calculant par exemple les différences d'altitude d'une structure entre deux images (**Arciniegas et al., 2007**) ou encore par l'analyse des données LiDAR (**Ji et al., 2019**). Ces méthodes cumulent l'analyse optique et radar (**Brunner et al., 2010**) par l'usage des images SPOT et PLÉIADES par exemple. Les traitements semi-automatiques sont issus des méthodes automatiques et ont pour but d'améliorer la lisibilité des images et de faire ressortir les changements entre deux états par photo-interprétation (**Andre et al.,**

2001). Toutefois, il existe une véritable demande méthodologique concernant ces méthodes de traitement afin qu'elles soient transférables et universelles pour la praticabilité des différents ensembles de données de télédétection VHSR (très haute résolution spatiale)(*Klett, 2011*). De plus, les processus automatisés sont encore trop longs et peu fiables pour être intégrés de manière opérationnelle à ce type de chaine de production cartographique (*Kerle & Hoffman, 2013; Norman Kerle, 2010*). Par conséquent, la meilleure des méthodes actuelles réside dans l'interprétation manuelle et visuelle des données d'OT, et donc sur la compétence des opérateurs humains

Les traitements par photo-interprétation

L'analyse des dommages est donc essentiellement réalisée par photo-interprétation des images à haute résolution (50 cm pour Pléiades), et selon deux approches. La première, mono-temporelle, est effectuée en l'absence d'images de références. La comparaison des dommages s'effectue avec le bâtiment et son voisinage en analysant de manière générale la réflectance et la modification de la structure des objets (*Andre et al., 2001*). Ce type d'analyse est difficile, notamment lorsque la qualité des images satellitaires n'est pas suffisante. La seconde approche, multi-temporelle (Figure 17), est basée sur la comparaison des images satellites acquises pendant ou jute après un événement catastrophique avec, si c'est possible, un état de référence obtenu grâce aux images archivées (*Yésou et al., 2015a*). À noter que chaque activation de la CHARTE ou du Service Copernicus EMS est spécifique et qu'il est impossible de connaitre à l'avance la disponibilité et la qualité des informations satellitaires qui seront mises à disposition (*de Boissezon & Dubois, 2014*). Pourtant, ces critères sont essentiels afin d'assurer la capacité de comparaison multi-dates et garantir une meilleure fiabilité des évaluations par photo-interprétation. Il est donc important d'assurer la mise à jour d'une base de données mondiale sur les enjeux et les événements antérieurs afin d'exploiter pleinement les images acquises lors d'une activation de ces dispositifs. De plus, l'acquisition des données pré-événements permet également de simuler et modéliser des risques qui pourront être validés et comparés lors des images acquises en situation de crise (*de Boissezon & Dubois, 2014*).

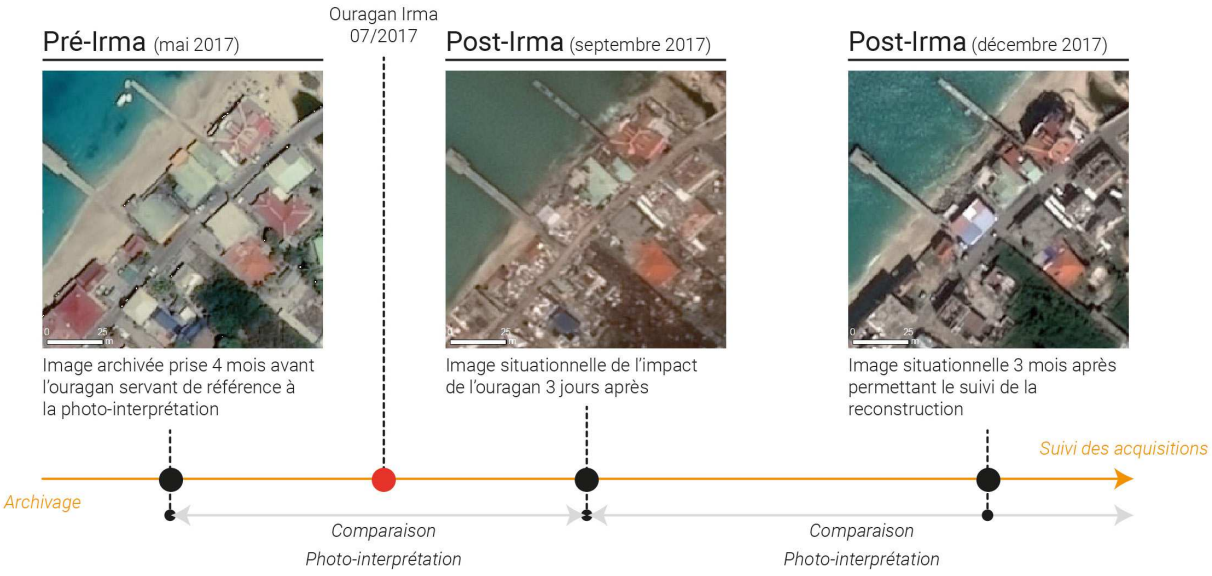


Figure 17 : Photo-interprétation selon l'approche multi-temporelle

Pour les services tels que Copernicus, l'observation des dommages est réalisée principalement par un procédé de photo-interprétation comparative des données optiques VHR acquises avant et après l'événement. À partir de ces images satellites, les services de cartographies rapides intégrés aux dispositifs ont la capacité d'opérer à distance et de proposer deux formes de services de cartographie à la demande : le *Rapid Mapping* qui fournit une information rapide des zones touchées et dont l'activation ne dure en moyenne que 3 à 5 jours et le *Risk & Recovery mapping* qui assure un suivi à plus long terme, notamment pour le suivi des phases de reconstruction. Ce cas d'application se retrouve pour les îles de Saint-Martin et de Saint-Barthélemy à la suite de l'ouragan Irma en 2017. A la demande de la Délégation interministérielle et du Ministère des Outre-Mer, les deux îles ont bénéficié d'un suivi des reconstructions couvrant la période de mars 2018 à juillet 2019. Pour établir les taux de reconstruction, l'analyse par comparaison d'images a pris en compte plusieurs indicateurs d'activités comme le déblaiement des débris, la démolition des bâtiments, l'apparition de nouvelles structures ou encore le niveau de reconstruction des toitures[14].

Comparativement aux méthodes automatiques, l'interprétation visuelle est chronophage (***Ji et al., 2019***), mais est encore largement privilégiée par les grandes organisations internationales comme la CHARTE, l'UNOSAT et Copernicus EMS (***Adriano et al., 2021; Kerle, 2010; Voigt et al., 2011***). Néanmoins, les traitements automatiques et semi-automatiques tendent à prendre une place de plus en plus prépondérante dans les méthodes d'analyse des dommages. Ces méthodes ont néanmoins en communs de se confronter aux mêmes problématiques, à savoir le traitement des images satellites. Ces dernières, pas toujours exploitables, doivent être corrigées, rectifiées afin d'être employées à des fins cartographiques. C'est par exemple le cas des couvertures nuageuses qui empêchent la visibilité des données topographiques, ou encore des effets atmosphériques qui viennent déformer la géométrie des images. Il est d'ailleurs nécessaire pour ces services de disposer d'une certification ISO 9001 afin de garantir la qualité de ces données. Par ailleurs, une phase importante est consacrée au pré-traitement et à l'harmonisation des données qui vont composer la cartographie rapide. C'est par exemple le cas des processus d'ortho-rectification des images issues de l'IGN, l'harmonisation de la nomenclature des tables attributaires des couches SIG, de la validation des informations manquantes. En outre, la conception de couches additionnelles est souvent nécessaire afin de compléter le manque de données disponibles ou qui ne sont pas à jour. A titre d'exemple, la BD TOPO IGN utilisée comme référentiel pour les bâtiments à Saint-Martin (Antilles du Nord) a fait l'objet de corrections et de mises à jour permettant son exploitation spécifique à l'évaluation des dommages *post* Irma (2017). Sur les 25 410 empreintes de bâtiments initiales, plus de 4000 ont été supprimées et complétées par les bâtiments manquants[15].

[14] https://emergency.copernicus.eu/mapping/list-of-components/EMSN049

[15] https://emergency.copernicus.eu/mapping/download/176669/EMSN049-Stage01_FinalReport.pdf?redirect=list-of-components/EMSN049

3.2.2. Critères d'évaluation des dommages

L'analyse des dommages est réalisée de manière conventionnelle à partir de l'échelle européenne macrosismique EMS-1998 (***Grünthal, 1998***). Ce travail se traduit par l'adaptation d'une typologie des dommages que chaque service de cartographie d'urgence par satellite (SEM) adapte en fonction de ses besoins et de ses services. C'est notamment le cas de l'UNOSAT (***Cooner et al., 2016***) et des SEM au sein du service de Copernicus. Dans les productions de l'UNOSAT, deux types de légendes sont distinguables. Lorsqu'il s'agit d'une catastrophe naturelle, on distingue généralement les bâtiments endommagés de ceux qui sont intacts. Lors d'une catastrophe anthropique (conflits armés) l'UNOSAT privilégie une typologie allant de « *moderate/possible damage* », « *severe damage* » à « *destroyed* ». Les cartes produites dans le cadre du service Copernicus ont par exemple incorporé jusqu'en 2018 une échelle d'intensité basée sur cinq classes, l'état de dommage allant du « dommage négligeable à léger », « dommage modéré », « dommage substantiel à important », « très endommagé » et « détruit » (Tableau 4). Cette dernière reprend l'échelle d'intensité EMS-1998 en intégrant l'évaluation des dommages du JRC pour les environnements construits en Syrie (***COPERNICUS EMSR, 2018; Klett, 2011; Voigt et al., 2011***). En utilisant cette échelle d'intensité, l'analyse des dommages opérée dans le cadre des actions Copernicus est organisée par un flux de travail divisé en quatre principaux ensembles d'activités :

- **L'identification des aires de dommages** : il s'agit de l'analyse des images aériennes, médias, vidéos, etc. afin de déterminer les zones ayant subi des dommages, permettant ainsi de concentrer le travail des équipes de photo-interprètes.

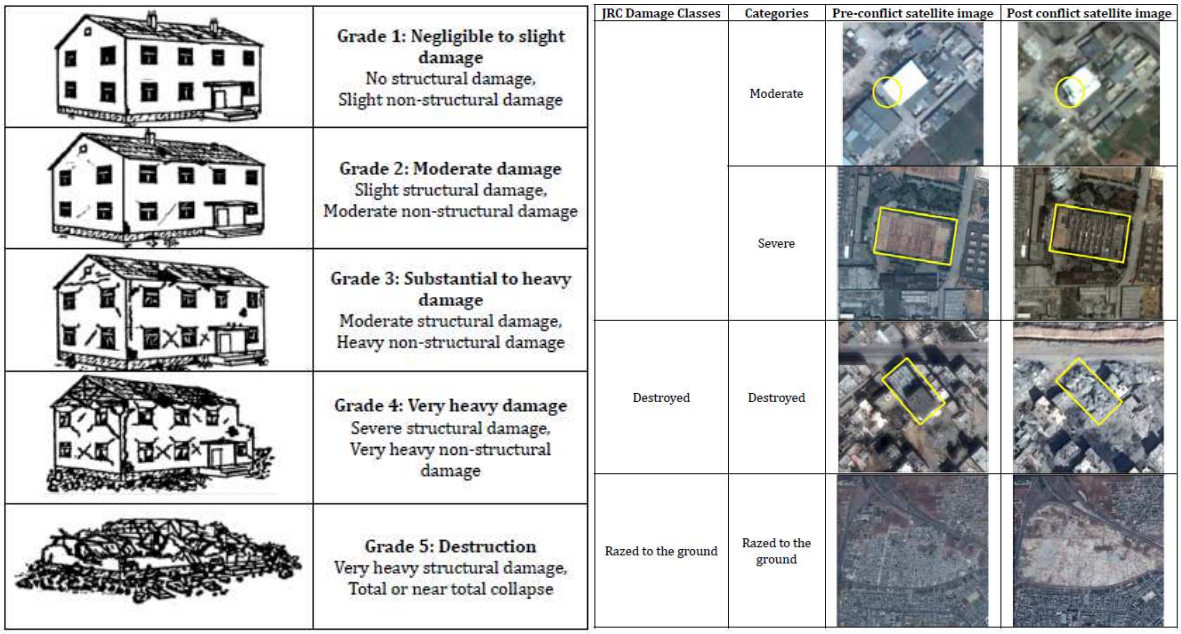
- **La définition des critères d'identification des dommages** : une équipe de photo-interprètes définit les zones touchées à partir de différents critères comme la présence de débris, arbres tombés ou encore les indices ou traces de zones inondées (laisses, surface en eaux, etc.).

- **La classification thématique** : les dommages classés selon plusieurs catégories définies par l'analyse particulière des toits ainsi que des conditions environnantes (état des barrières, végétation, etc.)

- **La production de la couche d'évaluation des dommages matériels** : les évaluations de dommage sont référencées à partir des empreintes des bâtiments que l'on retrouve sur les couches SIG de références avant événement. À partir de là, une nouvelle entité surfacique est générée.

Chaque interprète est assigné à une zone spécifique qui une fois sa tâche réalisée fait contrôler son produit par la prochaine personne du cycle de contrôle qualité (***Klett, 2011***).

Tableau 4 : A gauche, classification des dommages issue de l'échelle macrosismique européenne (EMS-1998) ; à droite, exemple des niveaux de dommage issu du Guide du JRC (Source : Rapport final du stage 03EMSN049, 2018)



Depuis peu, le groupe de travail international sur les services de cartographie rapide basés sur les satellites (IWG-SEM) a proposé une classification simple, mais standardisée des dommages aux bâtiments. Cette dernière a pour but « d'être adoptée au niveau international, en particulier pour accroitre la cohérence des informations thématiques fournies par les différents services de cartographie rapide pour un même événement, en rationalisant l'exploitation des informations de crise par les utilisateurs finaux » (IWG-SEM, 2018). Cette échelle réduit à quatre le nombre de classes de bâtiments endommagés. Elle propose de conserver les classes « détruit » et « aucun dommage visible » et d'alimenter leur définition et de rajouter deux classes afin de distinguer les bâtiments « endommagés », mais non détruits, et les bâtiments « potentiellement endommagés ». Cette dernière est établie à partir du moment où il est difficile d'estimer la présence de dommages à cause de multiples facteurs comme la qualité de l'image, la présence d'une masse nuageuse, etc. Cette reclassification moins ambigüe des dommages est intéressante, car elle met en évidence la persistance d'incertitudes liées aux méthodes d'évaluation des dommages.

3.3. Premières problématiques rencontrées

3.3.1. L'incertitude liée aux méthodes d'acquisition

Les processus d'analyse visuelle par photo-interprétation restent encore très largement utilisés pour l'évaluation des dommages *post*-catastrophes. Cependant, ils peuvent souffrir de lacunes d'ordre technique et/ou humain. Outre les défauts inhérents aux modélisations, logiciels et plus largement aux machines, l'interprétation des dommages se base sur une reconnaissance visuelle humaine des données brutes et du contenu de l'image. Le photo-interprète fait appel à sa perception et ses connaissances afin de faire la distinction et la comparaison entre les objets analysés. Ces fonctions sensorielles et cognitives sont donc un aspect central de l'interprétation visuelle des dommages à partir d'une image satellite (***Klett, 2011***). Il existe donc une ambiguïté quant à l'analyse des dommages, car cette dernière peut varier entre différents photo-interprètes (***Niesyto, 2006; Novikov et al., 2018***). De fait, l'interprétation des dommages peut également varier en fonction des services de cartographies rapides et/ou des procédures standardisées (cf. supra).

Au final, la fiabilité de la donnée qui résulte de ces traitements ne peut être évaluée (***Kerle & Widartono, 2008***) que par des investigations de terrain complémentaires (***Leone et al., sous presse; Ogawa & Yamazaki, 2000***). Sans quoi, l'évaluation de dommages est sujette à la question des incertitudes spatiales et attributaires inhérentes à tout procédé de photo-interprétation. L'analyse d'une partie de ces incertitudes s'est appuyée sur les données recueillies dans le cadre du projet TIREX[16] (Transfert des apprentIssages et des Retours d'Expériences pour le renforcement des capacités de réponse et d'adaptation individuelles et collectives dans un contexte de changement climatique - Petites Antilles du Nord - saison cyclonique 2017) dont les missions scientifiques ont débuté en octobre 2017, quelques semaines après le passage des ouragans Irma, Maria et José aux Antilles. Le projet, d'une durée de trois ans, compte à ce jour quatre missions qui ont été réalisées tous les six mois depuis octobre 2017. Les premières tâches ont consisté aux relevés des conséquences de l'ouragan Irma sur les îles françaises des Antilles du Nord, Saint-Martin et Saint-Barthélemy. Une partie des missions s'est attachée à évaluer les dommages à Saint-Martin très peu de temps après la catastrophe (fin octobre 2017) en se focalisant sur trois secteurs prédéfinis, à savoir Grand-Case, Baie Nettlé et Baie Orientale (Figure 18).

[16] Site web de TIREX : ***https://gred.ird.fr/programmes-de-recherche/projets-anr/tirex***

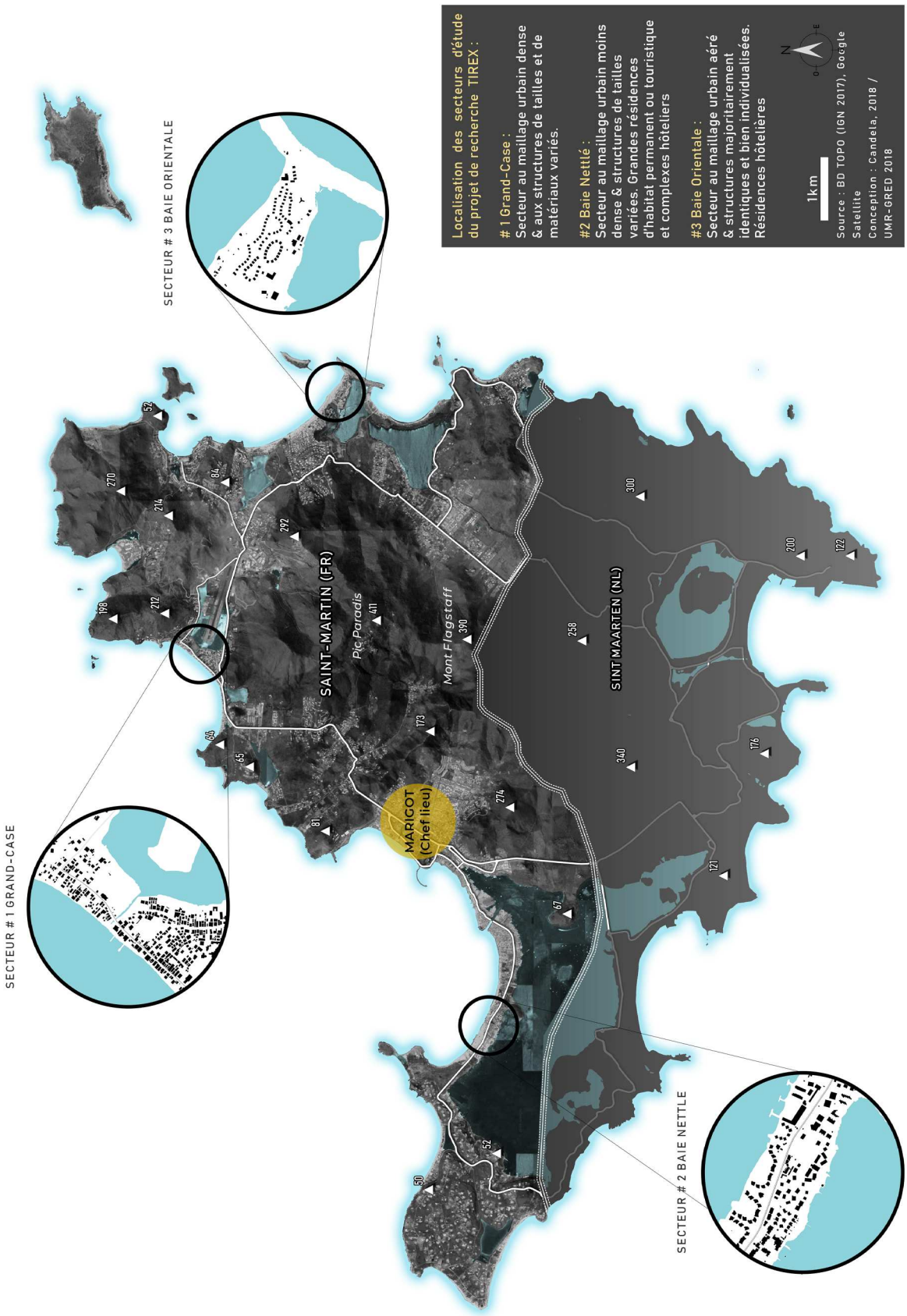


Figure 18 : Localisation des secteurs d'étude du projet ANR TIREX

Chacun des sites bénéficie d'un maillage urbain caractéristique de l'île. Grand-Case présente une forte densité de bâtiments de structures et de tailles variées. Baie Nettlé est composé d'un maillage plus ou moins dense dont la taille des bâtiments varie en fonction de l'usage (grand complexe hôtelier, habitat collectif, individuel). Le secteur de Baie Orientale (*Orient resort*) se caractérise par un maillage aéré dont les bâtiments bien individualisés sont majoritairement identiques. Nous avons mené ces diagnostics de dommages à la fois par observations de terrain et par drone puis nous les avons confrontés aux données fournies par les services de cartographie rapide Copernicus EMS & SERTIT produites à la mi-septembre 2017.

Une première étape a consisté à mettre en avant des écarts dans l'estimation des dommages à l'échelle des trois secteurs d'étude (Figure 18). Les données ont été rééchantillonnées en sélectionnant uniquement les bâtiments bénéficiant des trois analyses (UMR GRED terrain et drone, Copernicus EMS/satellite, SERTIT/Satellite). Cet ajustement a été réalisé manuellement sous SIG après avoir établi une échelle d'intensité des dommages à 4 niveaux commune aux 3 bases de données (***Rey et al., 2019***).

Les écarts d'évaluation entre le terrain et le traitement des images satellitaires ont montré la nécessité de valider ces dernières sur le terrain. Ils ont rapidement souligné les incohérences entre les sources de données auxquelles ont dû se confronter les gestionnaires et les opérateurs sur place. La méthode de confrontation des données des deux services de cartographie rapide (Copernicus EMS et SERTIT) à l'échelle de Saint-Martin (partie française) est présentée en Figure 19. Le choix de comparer les données du SERTIT et de Copernicus EMS soutient ainsi l'idée qu'il existe des facteurs d'incertitude liés à l'incomplétude de différentes sources d'information. Les incertitudes attributaires (le niveau de dommage) se cumulent aux incertitudes spatiales (localisation et nombre de bâtiments représentés) observables entre les deux services (***Candela et al., sous presse sous presse***).

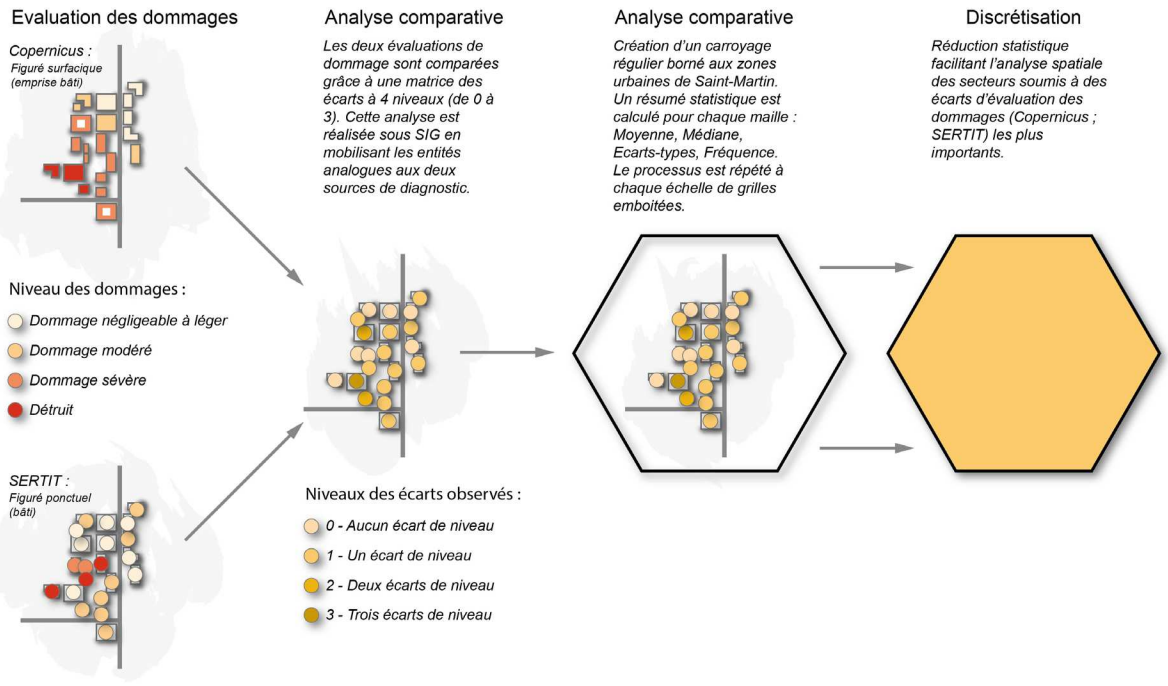


Figure 19 : Processus d'acquisition des écarts de dommages observés au bâti puis représentation à la maille par résumé statistique

Ainsi, 10 821 entités communes aux deux évaluations sont répertoriées et comparées à l'échelle du bâti. Les résultats montrent qu'il n'y a aucun écart d'évaluation pour 45% des entités tandis que 21% comptent au moins deux niveaux d'écart (Figure 20a). Ces divergences sont principalement observées pour les bâtiments moyennement endommagés (« *moderate damaged* ») et détruits (« *destroyed* »). Ces données sont cartographiées et agrégées sur la base d'un carroyage régulier borné à la zone urbaine de Saint-Martin (Figure 20b). Seules les mailles du carroyage possédant une valeur d'écart de [0 ; 1 ; 2 ; 3] sont visualisées. Les mailles sans valeur et/ou non incluses dans la zone urbaine ont été occultées afin d'identifier facilement les secteurs où ces écarts sont les plus fréquemment observés. Ces derniers se concentrent sur certains points de Saint-Martin, dont Marigot et le sud du quartier d'Orléans.

Ces résultats étayent les diagnostics de terrain : le maillage urbain et sa densité ont influencé le taux de précision et de perception des dommages au bâti par les opérateurs satellitaires. Cela semble augmenter la difficulté à déterminer des entités bien distinctes. Le manque de vision latérale des bâtiments (façades) ou les effets de « saturation de débris » spécifiques à ce type d'événement peuvent aussi compliquer la tâche. Rappelons aussi que l'analyse par photo-interprétation s'applique plus facilement à des dommages sur les toitures dus au vent contrairement à ceux dus à la mer (houle) et qui échappent au regard du photo-interprète. Les zones de submersion marine sont donc plus sujettes à des biais d'analyse, à Grand-Case par exemple (***Rey et al., 2019***).

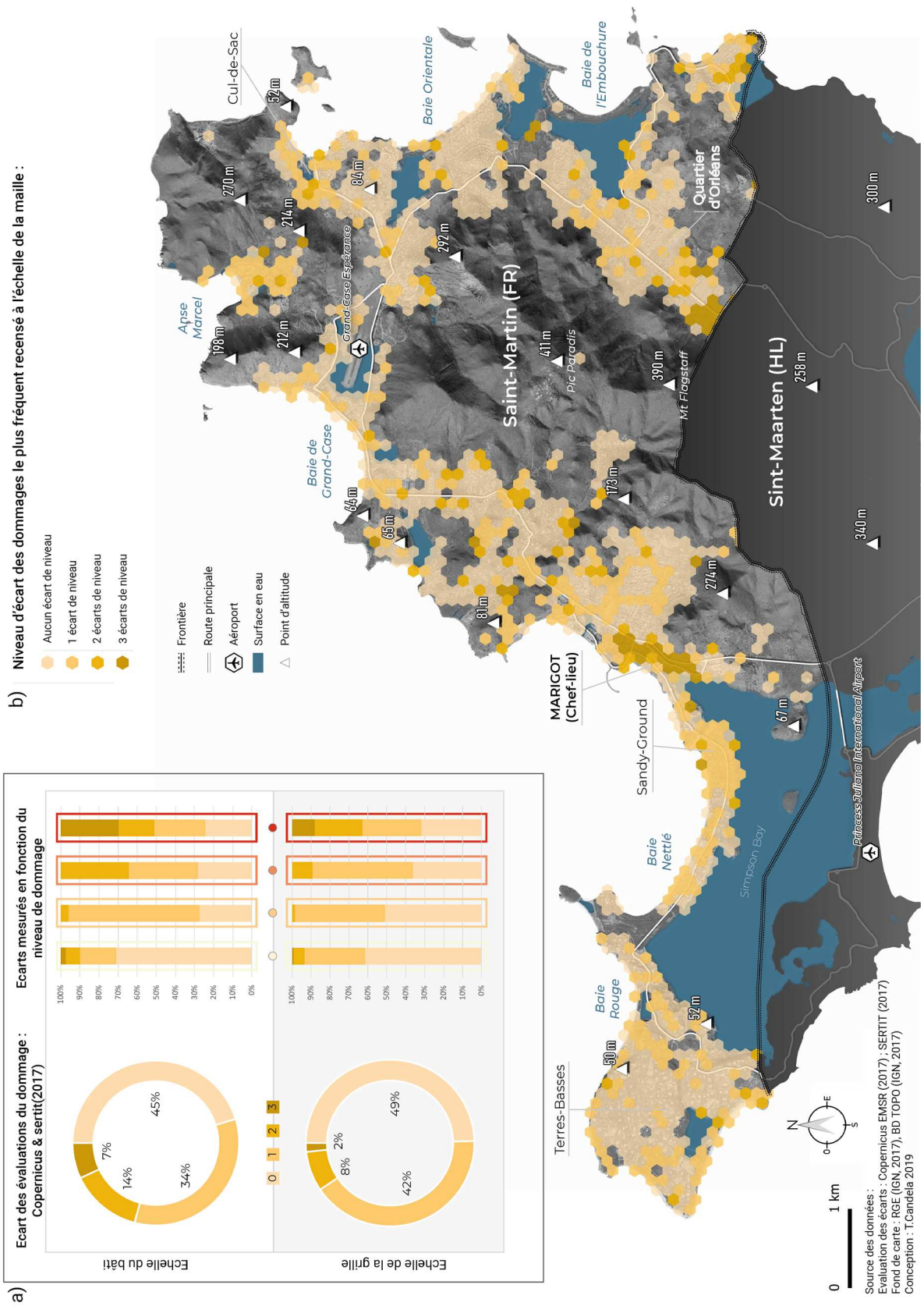


*Figure 20 : Écarts mesurés & comparés à l'échelle du bâti et de la maille (150 m * 173 m) à partir des évaluations de dommage Copernicus EMS vs SERTIT, 2017 (a), et représentation spatiale sur la partie française (b).*

Pour conclure, ces résultats illustrent les incertitudes obtenues lorsque plusieurs sources de données issues de services de cartographies rapides, à des pas de temps similaires, sont mobilisées et superposées. Des incertitudes produites en partie par les processus de photo-interprétation qui, en plus de l'analyse des dommages, peuvent être expliquées par la couverture nuageuse épaisse qui stagna après le passage de l'ouragan Irma. Certaines parties des images satellitaires acquises au lendemain de l'événement illustrent bien ces problèmes d'occultation.

À ces incertitudes « contextuelles » peuvent également se rajouter les incertitudes « interprétatives ». Ces dernières sont favorisées par la confrontation dans le même espace géographique de plusieurs cartes illustrant les dommages pour une même catastrophe. Ce raisonnement est mis en avant par Kerle et Hoffman (***2013***) après avoir confronté plusieurs cartes des dommages produites à la suite du séisme de Haïti en 2010. Dès lors, se pose la question des conséquences de cette diversité auprès des utilisateurs finaux et sur la prise de décision.

3.3.2. L'incertitude liée à la diversité des modes de représentation

Par leur apport opérationnel sans précédent, les cartographies *post*-catastrophes sont des outils d'aide à la décision très utiles aux situations d'urgence. Pourtant, les méthodes de construction et de représentations cartographiques souffrent d'un manque d'harmonisation ayant pour conséquence une diversité des cartes d'un point de vue sémiologique, graphique et informationnel. Malgré des efforts de standardisation, la diversité des acteurs concernés et des producteurs ne facilite pas la mise en place d'un consensus international. Ce constat a particulièrement été observé lors l'activation de la CHARTE après le séisme d'Haïti en 2010. La production pléthorique de données multi-sources rapidement disponibles (plus de 600 cartes) a abouti à une forme de « catastrophe cartographique » (***Voigt et al., 2011***).

L'activation de la CHARTE et l'intervention des images satellitaires

Le traitement cartographique de cette catastrophe a été particulier en raison du nombre important de données multi sources rendues rapidement disponibles pour aider la gestion de crise (***Lemoine et al., 2013***). La CHARTE, activée sous l'identifiant « Charter Call ID 288 », a profité des conditions météorologiques favorables du mois de janvier pour faire l'acquisition le 13/01/2010, de données satellitaires optiques et multispectrales telles que les données World-View-I et II et les données GeoEye-1 (***Klett, 2011***). Pour cartographier la situation et évaluer rapidement les dommages, les producteurs ont eu recours soit à l'interprétation visuelle assistée par ordinateur (***Voigt et al., 2011***), soit aux calculs automatiques par l'intermédiaire de méthodes mono-temporelles ou multi-temporelles (***Lemoine et al., 2013***). Cette catastrophe a été tout aussi singulière par la mobilisation exceptionnelle du crowdsourcing et de la cartographie collaborative mobilisée (***Kerle & Hoffman, 2013***), notamment grâce à la mise à disposition des données GeoEye au domaine public via Google Earth et un *file transfer protocol* (FTP) (***Lemoine et al., 2013***).

Etat des lieux sur la cartographie des dommages à la suite du séisme de Haïti (2010)

À la suite du séisme du 12 janvier, un grand nombre de cartes ont été produites par les différents services de cartographies d'urgence, dont beaucoup d'entre elles durant les premiers jours après la catastrophe (Figure 21) afin d'assister la gestion de crise (***Klett, 2011***). Un premier recensement établi à partir du site RELIEFWEB[17] répertorie près de 630 cartes réalisées en réponse au séisme de Haïti. Un nombre beaucoup plus élevé, plus de 2000, a été estimé par Shankar *et al.* (***2010***). Cependant, toutes ces cartes ne sont pas uniquement dédiées à l'évaluation des dommages. La gamme de produits cartographiques s'est élargie avec le temps, notamment grâce à la diversité croissante des acteurs impliqués dans la réponse à la catastrophe.

Ces cartes présentent d'autres informations thématiques utiles à la contextualisation de la catastrophe par exemple : les intensités ressenties, les migrations des populations, les camps de réfugiés, etc.

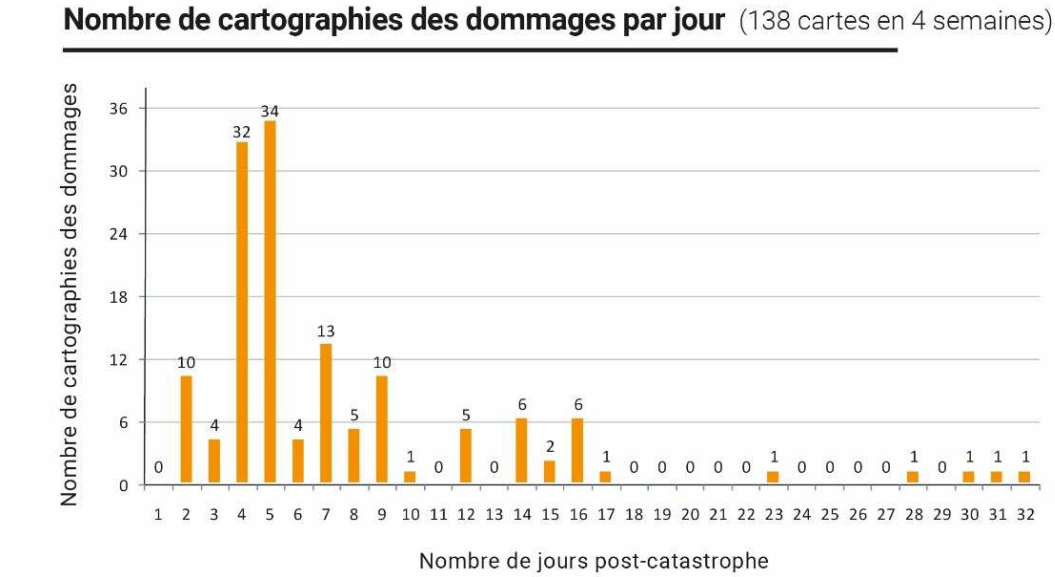


Figure 21 : Evolution du nombre de cartographies des dommages produites par jour à la suite du séisme de Haïti du12 janvier 2010. (Source : Klett, 2011, RELIEFWEB, n.d.)

À la suite du séisme, cette émulation cartographique a donné lieu à différentes représentations du dommage à des échelles variées allant du 1 : 7 500 au 1 : 55 000 et presque toutes ont été optimisées pour une impression grand format (A3) (***Klett, 2011***). Cette diversité s'explique par l'absence de normes cartographiques pour ce type de carte et le manque de concertation et de coordination autour de leur production et de leur diffusion (***Kerle, 2013***). Aux productions réalisées par les services traditionnels activés par la CHARTE se sont rajoutées celles conçues par divers acteurs et organismes dans l'intérêt de leur mission et en fonction de leur domaine d'expertise (***Kerle, 2010***). De manière générale, ces productions reflètent à la fois la spécialisation croissante de ces services de cartographie d'urgence et les différents acteurs qui gravitent autour de la crise. Parmi ces derniers, on retrouve e-GEOS, MapAction,

[17] https://RELIEFWEB.int/updates?advanced-search=%28D5727%29_%28F12%29

le SERTIT[18], l'UNOSAT[19], ITHACA[20], etc. Chacun fournit une assistance en fonction de ses compétences et de ses ressources satellitaires avec pour vocation de pouvoir s'adapter à la demande et à certains aspects spécifiques de la catastrophe (***Klett, 2011***).

Cette production pléthorique et variée se traduit par des représentations aux échelles du bâtiment individuel, des blocs urbains, des grilles de carroyage, et ce au moyen de nuages de densité ou encore d'implantations ponctuelles. Les niveaux de dommages sont gradués avec rampes de couleurs continues, à partir de la moyenne des dommages, le décompte, ou encore une simple identification des bâtiments détruits ou endommagés (***Kerle, 2010***). Cette diversité échantillonnée par Kerle et Hoffman (***2013***) est présentée sur la Figure 22.

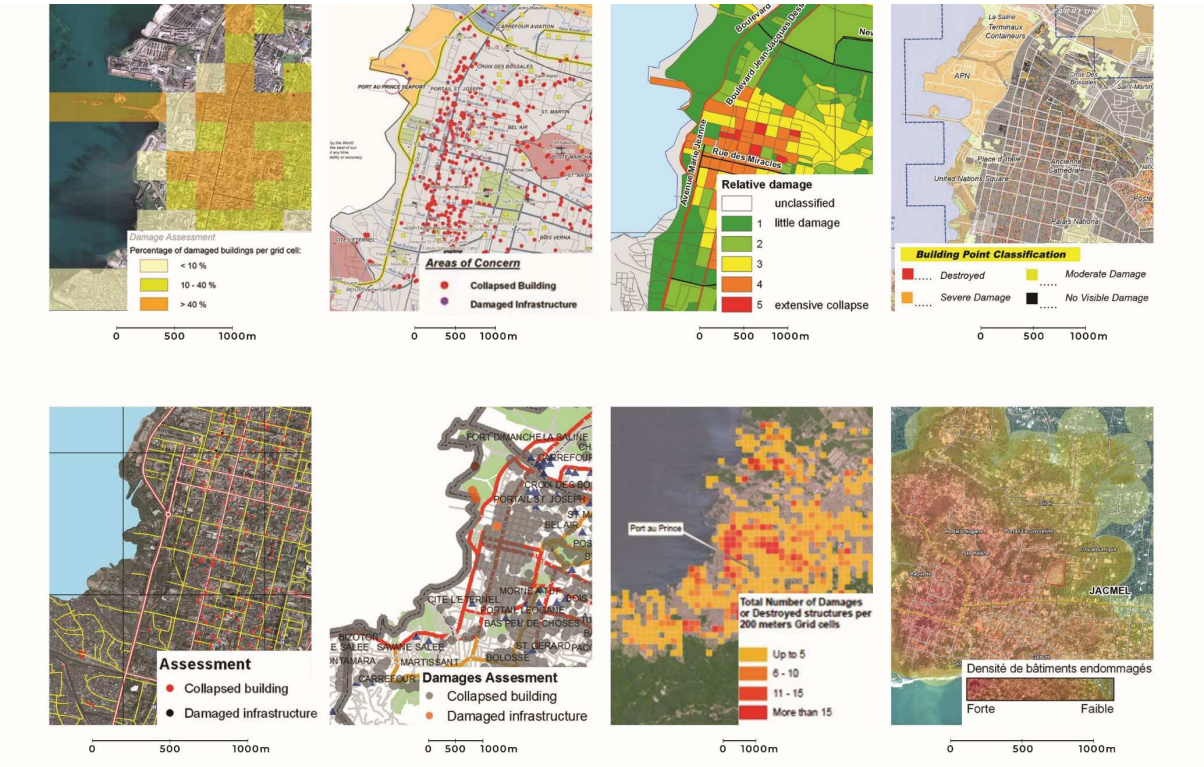


Figure 22 : Diversité des représentations du dommage à la suite du séisme de Haïti, 2010 (Kerle & Hoffman, 2013)

Finalement, l'information qui ressort de ces cartes est hétérogène, voire contradictoire. L'analyse finale peut être perturbée par l'incertitude décisionnelle relative à des divergences d'interprétation. Ce constat soulève alors certaines questions : comment la diversité de ces acteurs mobilisés implique-t-elle une appropriation différente des données ? Pareillement, la diversité des représentations cartographiques engendre-t-elle une appropriation différente des données ? Quels sont les facteurs qui faciliteront la compréhension commune des données ? De fait, il est probable que la grande hétérogénéité des méthodes de représentation des dommages a entravé l'interprétation des cartes par les utilisateurs, alors même que selon Andrienko et Andrienko (***2007***) les informations doivent être présentées de manière à

[18] Service régional de traitement d'image et de télédétection
[19] United Nations Institute for Training and Research
[20] Information Technology for Humanitarian Assistance, Cooperation and Action

favoriser leur perception rapide, leur bonne compréhension et leur utilisation efficace notamment en situation de crise.

En conclusion, il existe des incertitudes dès les phases d'acquisition, de traitement et d'attribution de la donnée. Le lecteur ne perçoit que le résultat final, la carte, qui n'est que la partie visible de l'iceberg. Il n'a pas la connaissance des biais potentiels engendrés par la diversité des résultats *in situ* et *ex-situ*. L'utilisateur de la carte jongle ainsi entre sa connaissance du terrain et ce qu'il sait ou ne sait pas afin de fournir une information efficace. De plus, les catastrophes de grandes ampleurs sont susceptibles d'engendrer une chaine importante de productions cartographiques qui à l'échelle internationale ne bénéficie pas encore d'un consensus graphique et sémiologique. Le cas de Haïti n'est pas un cas isolé. Si l'on remonte encore un peu plus loin dans le temps, en 2006, le séisme qui frappa Yogyakarta en Indonésie est déjà révélateur d'un usage hétérogène des méthodes cartographiques servant à illustrer les dommages (***Kerle, 2010***). Ce fut aussi et plus récemment le cas des cartes produites à la suite de l'ouragan Irma (2017) qui toucha la Caraïbe et du séisme de Célèbes en 2018 dans la province de Palu. Les cartes de dommages *post*-catastrophes, comme toutes productions cartographiques, se caractérisent par un ensemble de critères graphiques porteur d'une information et d'une sensation liée à ses aspects graphiques. Si on la veut efficace, la carte doit prendre en compte des paramètres d'efficacité visuelle et finalement cognitive, qui plus est lorsqu'on sait que la gamme des utilisateurs finaux tend à se diversifier. Le développement récent de la cartographie rapide *post*-catastrophes et sa diversité implique également un manque de reconnaissance visuelle de ces supports par les utilisateurs. Cependant, nous supposons qu'il est possible d'extraire des signes graphiques bien spécifiques à ce type de carte afin d'en améliorer l'efficacité et l'appropriation par le plus grand nombre d'utilisateurs.

Si les problématiques soulevées par les chercheurs concernant la diversité des cartes de dommages n'ont pas fait l'objet d'études approfondies, les interrogations qu'elles soulèvent sont tout de même fondées sur les concepts fondamentaux de la communication et de la visualisation cartographique. Ces grands paradigmes de la cartographie replacent la carte, sa conception et ses usages au cœur d'une réflexion scientifique. Ils visent à optimiser à la fois la communication, l'interprétation de l'information et la capacité d'appropriation de la carte par l'utilisateur en s'appuyant notamment sur la sémiologie graphique de Bertin (***1967***).

Chapitre 4 : L'apport des modèles cartographiques et de la sémiologie graphique pour l'optimisation des cartes utiles à la gestion de crise

4.1. Cadre théorique de la communication cartographique

4.1.1. Le rôle de la perception visuelle et de la cognition dans la lecture d'une carte

Le fonctionnement de l'œil dans les processus pré-attentifs et attentifs

L'œil est l'organe qui permet la vision. Vision qui est elle-même la principale modalité sensorielle de l'homme pour analyser et interagir avec son environnement à travers une « scène visuelle » (***Imbert, 1988***). L'œil fonctionne grâce à une captation et un encodage de la lumière qui est réfléchie par les objets qui composent la scène. Cette lumière pénètre via une ouverture de petite taille, la pupille, et est projetée sur la rétine. Ces processus sont permis grâce aux cellules photosensibles et photoréceptrices qui composent notre rétine (***Dhee, 2013***). S'en suit une couche du traitement de l'information, qui génère une image visuelle (Figure 23). Cette reproduction de la scène visuelle est transmise vers le cerveau qui traite l'information et aboutit à une représentation mentale (***Sève, 2009***).

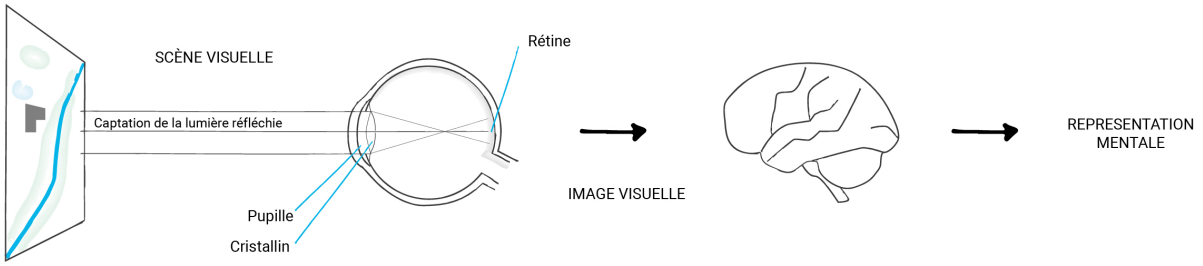


Figure 23 : Transformation de la scène visuelle en représentation mentale

Cette image visuelle est centrée sur la zone fovéale et stimule deux types de photorécepteurs, les cônes et les bâtonnets. Ces derniers sont respectivement sensibles aux conditions de luminosité et d'obscurité. La zone fovéale se caractérise par une zone de lecture circulaire d'un diamètre relativement petit, de 1,5 mm de diamètre soit environ 3° du champ visuel (***Yao-N'dré, 2013***) (Figure 24). Toutefois, celle-ci bénéficie d'une grande netteté due à la présence importante des cônes et d'un tiers des cellules ganglionnaires. Ces dernières forment le nerf optique qui a pour rôle de transmettre l'information au cerveau. La densité décroissante des photorécepteurs coniques avec l'éloignement du centre de la zone fovéale implique par ailleurs que tout objet périphérique à cette zone de lecture doit être suffisamment saillant pour attirer le regard (***Castner & Eastman, 1985 ; MacEachren, 1995***). Qui plus est, la faible surface de netteté de la vision est différente en fonction de l'écart entre la personne et chaque objet qui compose la scène visuelle (***Panero & Zelnik, 1979)***. La précision visuelle sera ainsi dépendante de l'axe de vision et des caractéristiques propres à l'objet (formes, couleurs, contraste, saillance, etc.).

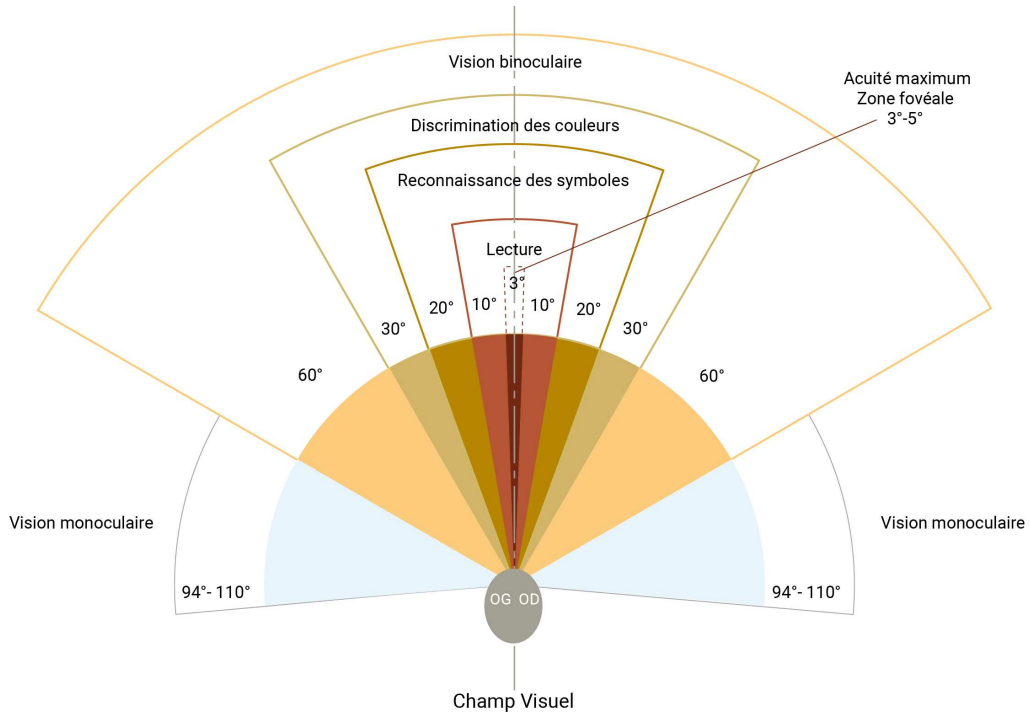


Figure 24 : Schéma champ de vision humaine[21]

Toutefois, le système optique n'est pas parfait et il peut être soumis à certaines déficiences chromatiques qui seront plus ou moins corrigées par le cerveau (***Dhee, 2013***). Ces problèmes de perception colorimétrique peuvent être imputés à des lésions, des troubles ou tout simplement à l'âge de la personne (vieillissement). Cependant, il existe aussi des perturbations chromatiques qui ne sont pas liées à ces paramètres et c'est notamment le cas des dyschromatopsies (Daltonisme).

Ainsi, l'ensemble de ces caractéristiques rétiniennes aboutit à des mouvements oculaires, et/ou de tête et du corps, qui permettent de recentrer la zone fovéale sur les différentes parties d'une scène visuelle. Dans notre cas spécifique, ces phénomènes sont à la base de la perception spontanée et de la bonne lisibilité d'une carte. Il convient d'ailleurs de préciser la différence entre « sensation » et « perception ». La première est la réponse aux stimuli des récepteurs sensoriels. La seconde intègre la reconnaissance et l'interprétation de la sensation. Ce domaine d'étude a notamment donné lieu à des approches théoriques, particulièrement en psychologie et que l'on nomme la psychophysique. Cette branche fait le lien entre l'intensité du stimulus et la force de sensation dont dépendent les seuils de perception (***Bagot, 1999***). Cette perception est donc implicitement liée à la combinaison de facteurs qui animent nos sens et favorisent des processus pré-attentifs et attentifs de la vision. Il s'agit de la détection des régions saillantes (pré-attentifs) puis de la focalisation de l'attention visuelle sur ces régions (attentifs) afin de décrire les informations (***Itti & Koch, 2001***). Jegou (***2013***) parle alors de processus ascendants (bottom-up) et descendants (top-down) correspondant à l'acquisition et au décodage d'une scène visuelle. Ces processus conduisent à des stratégies visuelles qui sont étudiées dans cette thèse au moyen des procédés de l'Eye-tracking (cf. infra 8.2).

[21] *https://fr.wikipedia.org/wiki/Champ_visuel (Rheto, 2010)*

Le fonctionnement de la mémoire

Depuis les années 60-70, les sciences cognitives considèrent que la mémoire est composée de différents registres qui se différencient par leurs fonctions. Par exemple, l'encodage correspond à la capacité d'acquisition de nouvelles informations en provenance de l'extérieur. Le stockage et la récupération favorisent la pérennisation de ses informations et leur exploitation. Plusieurs modèles ont été proposés pour comprendre le fonctionnement de cette mémoire.

Le modèle modal de Broadbent (***1958***) estime que le système cognitif est composé de trois sous-systèmes comprenant un registre sensoriel, une mémoire à court terme et une mémoire à long terme. D'après ce modèle, l'être humain est soumis à de nombreux stimuli sensoriels venant de l'extérieur. Ils sont assimilés par nos différents sens. C'est-à-dire le son, l'odeur, la vision, mais également le toucher. Ces informations sont tout d'abord stockées quelques secondes dans la mémoire à court terme ou mémoire temporaire (*short terme store*). Une fois les informations assimilées, elles sont filtrées en fonction de leur pertinence et sont transmises par un canal limité vers la mémoire à long terme (***Broadbent, 1958***). Ces formes de mémoire, sont à la fois interconnectées et autonomes (***Croisile, 2009***). Elles ont été mises en évidence grâce à des études menées sur des patients atteints de troubles cognitifs. Cette compréhension de la mémoire s'est affinée au cours du temps avec des différenciations (Tableau 5)

Tableau 5 : Type de mémoire et différenciations

Mémoire à court terme Conservation des informations sur une courte durée	**La mémoire immédiate**, transitoire (***Rossi, 2005***) qui permet de retenir une quantité limitée d'informations pendant un temps limité (environ 30 secondes).
	La mémoire de travail qui remplace la mémoire immédiate pour « maintenir disponibles des informations perçues et activer les connaissances et procédures qui sont nécessaires à leurs traitements » (***Baddeley, 1992***). Elle se compose notamment d'une mémoire tampon qui sert d'interface entre la mémoire à court et à long terme.
Mémoire à long terme Conservation des informations de quelques minutes à plusieurs années	**La mémoire procédurale** (non déclarative) qui est dédiée à l'apprentissage inconscient et qui aboutit à la maitrise d'un savoir-faire (***Croisile, 2009***). Il s'agit de programmes cognitifs liés à des actes quotidiens qui sont devenus automatiques.
	La **mémoire sémantique**, qui se base sur les connaissances acquises par itération. Cette mémorisation est indépendante du contexte d'apprentissage et de celui lié aux attributs émotionnels (***Croisile, 2009***).
	La **mémoire épisodique**, qui repose sur « la mémoire des événements personnellement vécus, situés dans leur contexte spatio-temporel d'acquisition » (***Meulemans et al., 2003***).
	La **mémoire perceptive** qui s'appuie sur nos sens. C'est notamment le cas d'une personne qui va retenir une image ou des sons souvent à son insu (***Croisile, 2009***). Cette mémoire permet en outre la création de cartes mentales à partir de repères sensoriels spatiaux.

Cette mémoire (connaissance empirique) joue un rôle déterminant dans le processus de communication, de visualisation et d'interprétation d'une information. En fonction des tâches à réaliser, une personne mobilise plusieurs fonctions de sa mémoire. Elle cherchera si possible à retrouver, reconnaitre ou se remémorer un ensemble de connaissances antérieures (mémoire à long terme) qui vont alimenter une mémoire temporaire (mémoire de travail) afin répondre à une tâche intellectuelle ou à la comparaison d'une information nouvelle (***Croisile, 2009***).

En conclusion, la perception visuelle et le fonctionnement de la mémoire sont deux facteurs prédominants pour la lecture d'une carte. Cette dernière, grâce à des caractéristiques bien spécifiques, permet d'optimiser la communication cartographique de l'information.

4.1.2. Le modèle de la communication cartographique

La communication cartographique, d'un modèle à une réflexion

Bon nombre de chercheurs se sont penchés sur les questions du lien entre l'homme et l'image graphique, de la transmission de l'information à la compréhension du message. Ces réflexions ont donné lieu à la communication cartographique qui peut être définie comme le processus de transmission effective des relations spatiales entre le cartographe (l'émetteur) et l'utilisateur (le récepteur) (***Koláčný, 1969; MacEachren, 1995***). Cette communication cartographique est l'aboutissement d'un modèle de transmission d'informations établissant le croisement entre la théorie mathématique de la communication (***Moles, 1964; Shannon, 1948 ; Shannon et Weaver, 1949 ; Weaver, 1953***) et les théories de la cartographie (***Bertin, 1967; Robinson, 1952***). Bien que ses fondements soient antérieurs aux années 60, c'est à partir de cette période qu'émerge explicitement ce modèle, autrement connu sous l'appellation anglo-saxonne « *map communication model* » (***Crampton, 2011 ; Plantin, 2014b***). À la lecture d'une carte, il existe une différence entre l'information mise en carte par le cartographe et la perception que le groupe d'utilisateurs ciblé aura de cette information (***Popelka et al., 2012***). En partant du postulat d'une déconnexion entre l'émetteur et le récepteur, ce modèle a pour objectif d'analyser les processus de transmission de l'information par la carte et les « bruits » pouvant perturber le message final. L'écart entre ces variables d'entrée et de sortie permet de mesurer l'efficacité et la lisibilité de la carte. L'acquisition, l'interprétation et la mise en mémoire du message final seront dépendantes des capacités cognitives et sensorielles du récepteur (***Crampton, 2001 ; Fairbairn, 2006 ; Jégou & Deblonde, 2012***). Une carte efficace doit ainsi offrir une interprétation équivalente à celle que son concepteur a voulu fournir (***Petchenik, 1977***).

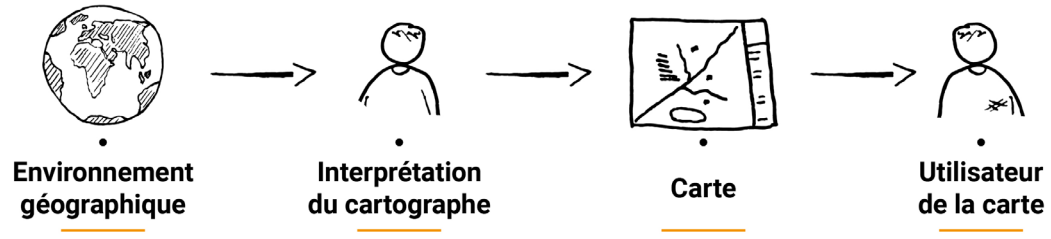


Figure 25 : Archétype général de la carte comme processus de communication de l'information

À partir de cet archétype (Figure 25), plusieurs formes de modèle vont se développer (***Board, 1967 ; Keates, 1964***). Bien que les détails varient, tous ces modèles partagent une même structure de base, dans laquelle le cartographe sélectionne des informations du monde réel et décide de la manière dont elles sont représentées sur la carte (***Divjak et Lapaine, 2014***). L'utilisateur, quant à lui, lit la carte et comprend les informations affichées en faisant appel à ses connaissances antérieures.

La communication cartographique devient un paradigme de la cartographie dans les années 70 (***Crampton, 2001 ; Robinson et Petchenik, 1975***) notamment à travers le modèle de Koláčný (***1969***). Pour ce dernier, le processus de communication relève de plusieurs niveaux répartis à travers les modalités d'encodage de l'information (représentation cartographique) par le cartographe et de décodage par l'utilisateur (Figure *26*). Ces modalités sont influencées, d'une part par les objectifs (généralement dépendants des exigences des utilisateurs et du positionnement du concepteur), des connaissances, de l'expérience, ou encore des conditions extérieures (temps de lecture, conditions de lecture, etc.)(***Plantin, 2014b***) ; et d'autre part, selon différents choix techniques comme les processus d'abstraction, de projection, de symbologie, etc. qui présentent l'information (***Divjak et Lapaine, 2014***). D'autres facteurs viennent jouer un rôle important, comme les capacités perceptuelles et cognitives de la carte, ou les préjugés de l'émetteur et/ou du récepteur.

Ainsi, les connaissances cartographiques peuvent entrainer des erreurs d'interprétation et de communication dont le concepteur ou l'utilisateur n'ont pas toujours conscience et qui peuvent nuire au message cartographique. Cette approche n'est pas nouvelle et on la retrouve dans les sciences de la psychologie cognitive, notamment dans la théorie du traitement de l'information (***Le Ny, 1991***). Rimbert (***1973***) avait déjà entamé cette réflexion à travers des expériences de perception et de compréhension comparative sur les cartes thématiques (***Jégou, 2013***). Elle mettait en avant plusieurs éléments de réflexions. D'une part, le comportement du lecteur est influencé par le « message esthétique » (***Rimbert, 1973***) de la carte et d'autre part, il est essentiel que le concepteur prenne en compte les capacités de mémorisation visuelle de l'image graphique et donc le comportement de la mémoire du lecteur. Pour Bertin (***1972***), la cartographie est un moyen d'extrapoler, de réduire la pléthore d'indicateurs qui abondent dans les sociétés afin de créer des groupements utiles à la capacité de mémorisation de l'humain. Afin d'appuyer cette mémorisation, il développe un langage graphique faisant appel au niveau monosémique de la perception spatiale, c'est-à-dire dont le sens est prédéfini par convention (***Bertin, 2005***).

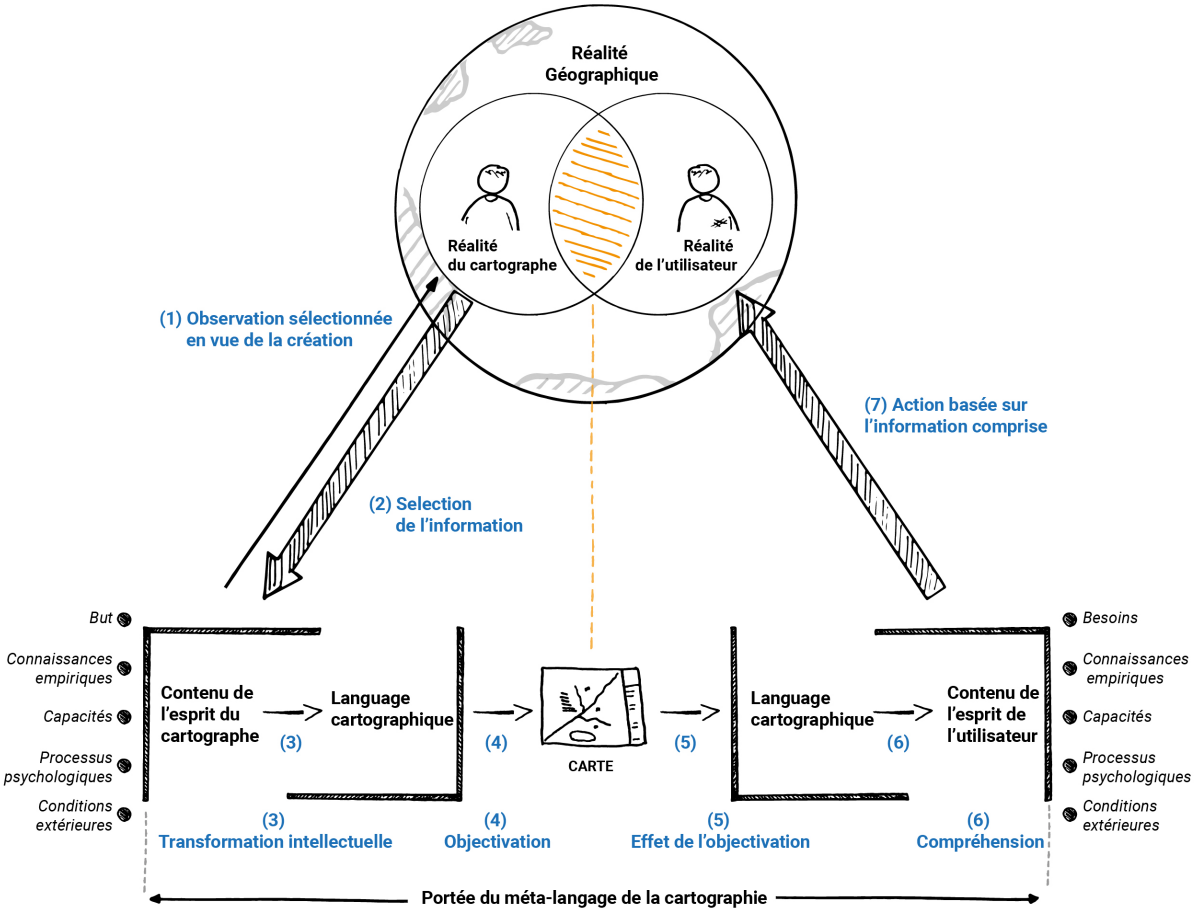


Figure 26 : Modèle de la communication cartographique selon Koláčný (1968)

4.1.3. La sémiologie graphique en cartographie

En 1967, alors que le modèle de communication cartographique prend de plus en plus d'importance, Bertin publie un ouvrage dans lequel il décrit la sémiologie (grammaire et fonctionnement) de toutes constructions graphiques. Des travaux qui répondaient à la nécessité du concepteur de transmettre une information efficace, rapidement et avec le moins d'erreurs et de mauvaises interprétations possibles. Pour atteindre cet objectif, Bertin (***1967***) s'est principalement appuyé sur l'existant, et même si le manque d'expérience utilisateur est l'une des principales critiques de ses travaux, ces derniers sont généralement reconnus et acceptés dans leurs grandes lignes. Par ailleurs, si l'étude de la graphique n'est pas dédiée spécifiquement à la cartographie, elle nourrit de nombreux ouvrages de cartographies francophones (***Béguin & Pumain, 1994; Bord, 2012; Cuenin, 1972; Lambert & Zanin, 2016; Le Fur, 2015; Poidevin, 1999; Steinberg, 2000; Zanin & Trémélo, 2003***) et anglo-saxonnes (***Dent et al., 1993; MacEachren, 1995; Robinson et al., 1984; Tyner, 2010; Wood & Fels, 1992***). Avec l'apport de la visualisation cartographique, la sémiologie graphique constitue encore un référentiel important dans la construction d'un rapport efficacité/esthétisme/utilité d'une carte. La section qui suit fait la synthèse des principaux concepts qui formalisent notre recherche.

Le type d'implantation de l'information géographique

La transcription graphique de l'information géographique est ramenée à trois éléments géométriques manipulables dans une carte ou un SIG : le point, la ligne et la surface (polygone). Ils permettent au concepteur de la carte de représenter les routes, les rivières, zones urbaines, sommets et tous autres éléments qui composent un espace géographique. Ce faisant, ils définissent « la relation existant entre une manifestation physique perçue (signifiant) et l'idée ou l'image mentale qui lui est associée (signifié) par un individu récepteur » (***Jégou, 2013, p. 71***), tout en considérant leur positionnement dans cet espace (coordonnées X, Y, Z). En outre, le concepteur de la carte doit prendre en considération l'évocation (idéation) que portent ces réalités afin de provoquer leur association avec les éléments cartographiés. Une rivière qui n'est pas bleue, mais verte, perd de sa signification auprès du lecteur. Ce rapport entre le signifiant et le signifié (***Pierce, 1978***) peut-être établi grâce à la forme que va prendre l'implantation (***Jégou, 2013***). Lorsqu'elle est ponctuelle, les représentations symboliques sont par définition analogues à la réalité. Lorsqu'ils sont abstraits, il est nécessaire de faire appel à des conventions afin d'en acquérir le sens. Dans ce cas précis, la sémiologie graphique apporte les moyens d'identifier, classer, regrouper l'information et vient en appui à une interprétation qui serait moins directe sans elle.

Puisqu'il s'agit d'une carte, le concepteur doit respecter les lois d'échelles. Cependant, pour assurer la lisibilité des éléments géométriques, il doit s'adapter à des seuils de perception et de discrimination. Pour cela, il peut appliquer une généralisation des données géographiques ou cartographiques afin de réduire ou augmenter la quantité d'éléments affichés grâce à des transformations géométriques ***(Buttenfield & McMaster, 1991; Timpf, 1999***). L'implantation de l'information est donc une notion importante puisqu'elle implique une simplification des entités géographiques au fur et à mesure de la descente d'échelle.

Ruas (***2004***) aborde la notion « d'échelle caractéristique » pour définir les échelles appropriées à ces processus de généralisation. Par exemple, lors du passage des grandes échelles aux petites échelles, les habitations sont affichées individuellement puis regroupées progressivement en blocs urbains (***Gaffuri, 2008***). Ces processus de généralisation doivent suivre une logique et ne pas perdre de sens. Ils sont définis par la nature même de l'information affichée.

La nature de l'information

La nature de l'information géographique est classée selon deux grandes familles composées elles-mêmes de deux sous catégories. Il s'agit d'une part de l'information qualitative qui se décline selon une information qualitative nominale et une information qualitative ordonnée ; et d'autre part de l'information quantitative qui se décline selon des caractères quantitatifs absolus (stock) ou relatifs (taux) (***Bertin, 1967; Charre, 2000***).

- **L'information qualitative nominale** : elle fait référence à une information qui n'est pas résultante d'un processus mathématique et qu'il est impossible d'ordonner. Cela peut être par exemple un type d'occupation du sol (habitat, forêt, réseau hydrographique, etc.).

- **L'information qualitative ordinale** : a contrario, lorsqu'elle est ordonnée, il est possible de classer l'information par ordre décroissant ou croissant selon un ensemble de modalités. Elle s'exprime par des mots, par exemple pour décrire différents niveaux d'endommagement : faible, moyen, fort, etc.

- **L'information quantitative absolue** (stock) : elle se définit par des valeurs numériques qu'il est possible d'ordonner (du plus petit au plus grand), mais sans moyen d'en estimer les rapports.

- **L'information quantitative relative** (taux) : *a contrario*, lorsqu'il s'agit d'un dénombrement effectif (nombre d'habitants dans une commune), il est possible d'effectuer des taux et d'ordonner l'information. Elle peut d'ailleurs servir à établir des intervalles.

En conséquence, la nature de l'information influence la manière dont elle va être représentée cartographiquement. Nous verrons plus tard que ce paramètre est un critère essentiel au développement d'un représentation cartographique limitant les erreurs d'interprétation des représentations strictement quantitatives ou qualitatives. Bertin (***1967***) introduit sept variables visuelles afin de représenter ces informations. Elles forment la composition élémentaire d'une image.

Les variables visuelles

Les variables visuelles sont fondamentales pour la construction de toute représentation cartographique (***Bertin, 1977***). Elles sont composées de la variable de position, de taille, de valeur, de grain, de couleur, d'orientation et de forme. Chacune de ces variables s'applique aux trois types d'implantations (ponctuelle, linéaire, surfacique) citées précédemment.

- **La position** concerne la localisation de la géométrie en X, Y sur le plan en deux dimensions et en Z pour le plan en 3 dimensions.

- **La taille** s'applique aux stimuli sensibles engagés par la variation d'épaisseur ou de surface d'un symbole géométrique. Elle s'applique aux implantations ponctuelles et linéaires. Elle doit prendre en compte les limites perceptibles (taille la plus petite) et les propriétés de l'objet représenté. En implantation zonale, il existe deux méthodes. La première consiste à créer des symboles proportionnels en se basant sur le centroïde de la géométrie. La seconde fonctionne par anamorphose. Cette technique consiste à modifier la géométrie de la surface en fonction d'une quantité. Dès lors la réalité physique devient une réalité perçue.

- **La valeur** correspond à « la progression continue que l'œil perçoit dans la suite des gris qui s'échelonnent du noir au blanc » (***Bertin, 1967, p. 73***) sur une surface donnée. Elle s'applique aux trois types d'implantation, mais est particulièrement efficace en surfacique.

- **Le grain (ou texture)** définit « la quantité de taches séparables contenues dans une surface unitaire » (***Bertin, 1967, p. 73***). Ainsi et contrairement à la variation de valeur, il n'y a pas de variation de quantité de blanc ou de noir. Elle s'applique par définition aux implantations surfaciques.

- **La couleur** est une variable particulière. Elle résulte des sensations (luminosité, ton et saturation) que notre œil reçoit lorsqu'il regarde un objet éclairé par une lumière naturelle. À noter que cette variable est dépendante des capacités et des déficiences chromatiques de l'utilisateur (***Dhee, 2013***). Elle s'emploie dans toutes les implantations. La couleur est bien souvent utilisée en variation de ton (chaud/froid), mais également en jouant sur les degrés de saturation d'un même ton, de même valeur.

- **L'orientation** correspond à l'inclinaison du symbole par rapport à l'horizontale. « C'est la différence d'angle entre des champs créés par plusieurs signes parallèles qui constitue le stimulus sensible de la variation d'orientation » (***Bertin, 1967, p. 93***).

- **La forme** correspond à la variation de structure des implantations. Principalement ponctuelles, elles peuvent néanmoins s'appliquer aux linéaires et à la structure interne des implantations surfaciques, lorsqu'elles sont combinées à une variable de grain. Lorsque la forme s'applique à des implantations ponctuelles, on parle de formes géométriques, symboliques et conventionnelles. Il est reconnu que pour être efficace cette variable ne doit pas afficher plus de sept formes sur une même carte et il faut que sa capacité de séparation soit suffisamment forte pour ne pas causer des associations.

Les propriétés perceptives des variables visuelles

Lorsqu'il a écrit sa grammaire de la graphique, Bertin (***1967***) a défini quatre types de propriétés perceptives des variables visuelles, à savoir :

- **Variable sélective / dissociative** : la sélectivité permet de percevoir instantanément un élément ou un ensemble d'éléments d'une même catégorie sur une image.

- **Variable associative** : l'association permet aux symboles d'une même catégorie d'être perçus malgré la diversité d'autres symboles sur l'image. Elle permet par exemple de distinguer les éléments hydrographiques d'une carte ou bien des symboles d'une même forme ou orientés dans le même sens.

- **Variable d'ordre** : on parle d'ordre lorsqu'il est possible de classer de manière spontanée et universelle des symboles sur une image. Une gradation peut être mise en place en utilisant des rapports de tailles (plus petit que ; plus grand que) ou encore de valeurs (plus clair que ; plus foncé que).

- **Variable quantitative** : une variable est considérée comme quantitative lorsque la distance visuelle entre les éléments d'une même composante peut s'exprimer par un rapport numérique. Ce symbole est deux fois, trois fois plus gros que cet autre symbole. L'utilisateur peut ainsi juger des quantités qui différencient les deux éléments.

Ainsi, il est possible d'établir la correspondance entre chaque variable visuelle et les propriétés perceptives qui leur sont propres. Cette correspondance est synthétisée dans la figure ci-dessous (Figure 27). La taille par exemple est la seule variable quantitative, en dehors de la variable de position. Elle est également sélective et ordonnée, mais ne permet pas l'association. La variable de valeur est ordonnée, mais non quantitative. Elle permet néanmoins la sélection et la dissociation entre plusieurs catégories ou dans les catégories. Pour être efficace, il est admis qu'il ne faut pas dépasser six ou sept paliers de variation de la teinte (***Dhee, 2013***). Le grain est ordonné, associatif et permet aussi la sélectivité. La couleur, quant à elle, permet l'association et la sélectivité. Elle n'est ni ordonnée, ni quantitative. Pour être efficace, le nombre de couleurs doit être limité et ne pas dépasser plus de quinze teintes (***Béguin & Pumain, 1994***). La couleur doit également être utilisée selon la représentativité de l'objet sur lequel elle s'applique. L'orientation est uniquement sélective et associative. S'il est possible de transcrire un nombre important d'inclinaisons différentes, Bertin (***1967***) précise qu'il ne faut pas en dépasser quatre, sans quoi on risque une perte de sélectivité. À l'instar des deux variables précédentes, la forme est sélective et associative.

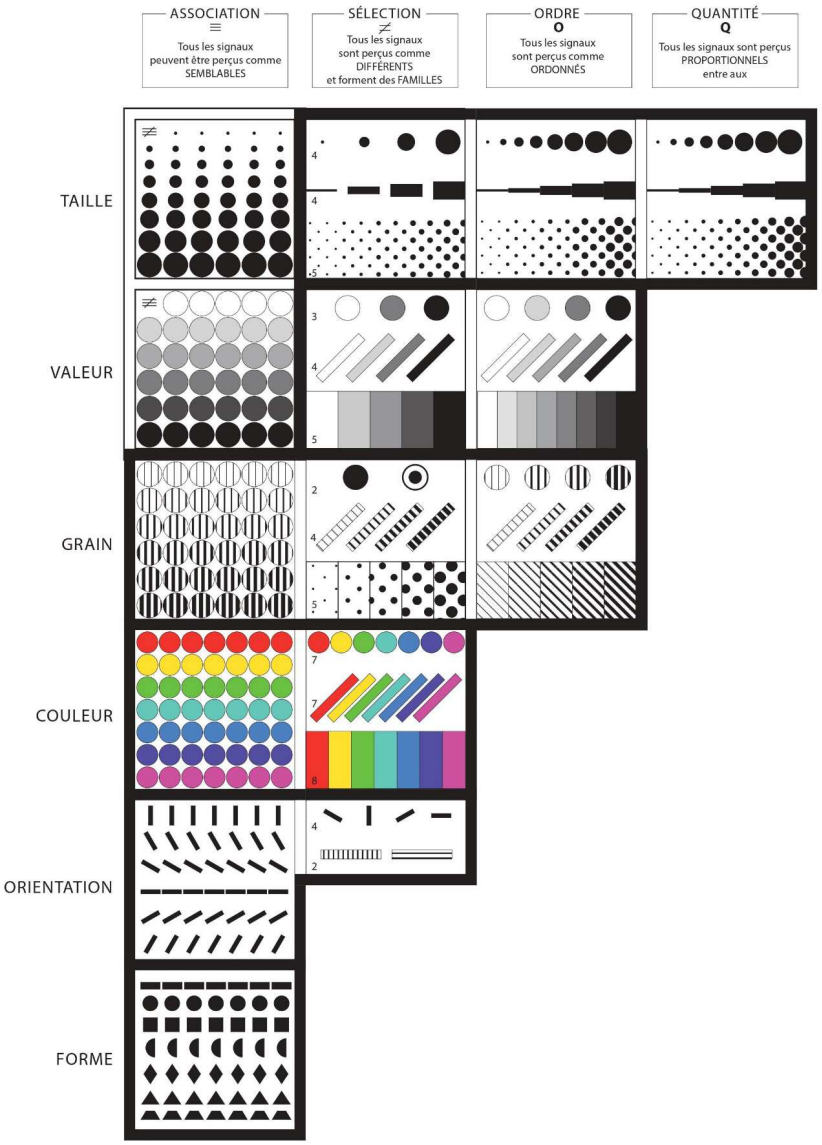


Figure 27 : Niveaux des variables rétiniennes (Bertin, 1973)

La synoptique de la construction cartographique

L'information quantitative ou qualitative doit être collectée sous une forme pratique avec ce qu'il faut d'exhaustivité pour ne pas rendre l'ensemble difficilement mémorisable (***Zanin, 2006a***). C'est d'ailleurs un paramètre important de la capacité de la carte qui se définit en outre par la quantité d'informations transmises. À partir des propriétés perceptives de ces variables visuelles, Bertin constate qu'il est possible de réaliser des combinaisons afin d'obtenir un plus haut niveau d'organisation. Dès lors, il fait la distinction entre les combinaisons redondantes, lorsque « plusieurs variables sont utilisées pour transcrire une seule composante » (***Bertin, 1967, p. 188***), et les combinaisons significatives, lorsque « dans une même implantation, deux variables sont affectées à une composante différente » (***Bertin, 1967, p. 189***). Les combinaisons redondantes permettent d'augmenter la séparation entre les paliers d'une composante et, *in fine,* le niveau de lisibilité et de sélectivité rétinienne. Quant à elles ; les combinaisons significatives permettent de transcrire deux informations différentes sur la base de deux variables différentes. Ces possibilités combinatoires sont plus qu'intéressantes puisqu'elles permettent d'améliorer le niveau d'organisation et de sélectivité des informations. En cartographie, elles permettent par exemple de superposer des variables quantitatives et qualitatives. De la même manière, il est possible de combiner différents types d'implantations sur lesquelles vont s'appliquer différentes variables.

En résumé, ces propriétés visuelles ont pour avantage d'optimiser la concentration de l'utilisateur sur les données essentielles à l'usage qui doit être fait de la carte, tout en réduisant par convention préalable les potentiels biais d'interprétation (***Chauvin, 2005***). Cependant, Bertin fixe des limites à ces propriétés visuelles en lien avec la quantité d'éléments à représenter sur une même image graphique et les limites de la perception visuelle. Il traite ce problème par la synoptique des constructions graphiques (***Bertin, 1977***). Par-là, il entend l'image générale que procure la vision d'ensemble des différentes variables représentées. Pour Bertin cette vision synoptique ne peut se faire que si les éléments représentés par différentes variables sont limités à trois. Au-delà, il est plus judicieux de construire plusieurs images ou bien de construire des matrices permettant de ne pas perdre les relations entre les différentes variables (***Bertin, 1977***). Bien qu'il ne soit pas suffisamment explicité, ce concept est particulièrement adapté à la carte, notamment à travers ce que l'on appelle « la synoptique de la construction cartographique ». Un concept qui se confronte à un contexte où les données se complexifient et sont de plus en plus nombreuses, notamment avec l'ouverture des bases de données et la démocratisation des systèmes d'information géographique. La cartographie classique montre ces limites et les variables visuelles de Bertin sont progressivement étendues et adaptées aux nouvelles techniques cartographiques afin de répondre aux nouvelles exigences de la géovisualisation ***(Bertin, 1977 ; Kraak, 2003 ; MacEachren & Kraak, 1997***). En parallèle, le modèle de la communication cartographique perd de son importance. Notamment à partir des années 80, lorsque Sui et Goodchild (***2001***) lui reprochent de ne pas suffisamment considérer la carte comme vecteur d'un contexte social, collectif et sentimental (***Plantin, 2014b***). De plus, le fort développement des SIG (Systèmes d'Information Géographique) à partir de cette période a largement participé à la réorientation des géographes vers la production de la carte plus qu'à l'analyse des processus de sa réception (***Montello, 2002***). La carte est porteuse d'informations, mais aussi d'hypothèses et de réflexions qui aboutissent à la prise de décision (***MacEachren, 2004***). Selon cette conception, la carte est un outil de choix permettant la visualisation des données géographiques.

4.2. De la communication cartographique à la visualisation cartographique

4.2.1. *La visualisation cartographique, pour l'exploration de l'information géographique*

La visualisation cartographique, que l'on retrouve également sous le terme de « géovisualisation » (***Bertin, 1977 ; MacEachren & Kraak, 1997***), est définie par Crampton (***2001, p. 245***) comme étant « la capacité des cartes, des graphiques et des images à rendre visibles les relations spatiales ». Ce dernier complète sa définition par les capacités supplémentaires des logiciels de cartographie modernes à permettre l'exploration et l'analyse des données spatiales. Ces capacités permettent à l'utilisateur de reconnaitre des modèles, générer des hypothèses, répondre à des besoins, alimenter des connaissances ou en découvrir de nouvelles (***Dorling & Fairbairn, 2013 ; Hallisey, 2005 ; Kraak, 2003 ; MacEachren, 1994***). La visualisation cartographique se caractérise donc par un haut niveau d'interactions entre les informations affichées sur la carte et l'utilisateur, à travers des processus de comparaison itératifs avec ses connaissances antérieures (***Hallisey, 2005; MacEachren, 1994***). Cette recherche sur la visualisation a donné lieu à de nombreux travaux comme la création de guides pratiques pour la création de bons graphiques (***Tufte & Graves-Morris, 1983***), l'utilisation des théories de Bertin pour l'automatisation de la visualisation des données (***Roth & Mattis, 1990***) ou encore l'investigation profonde des propriétés de la couleur (***Brewer, 1994***). Des travaux qui ont en commun d'établir des règles pour la construction d'une bonne visualisation claire et efficiente. « Une visualisation est bonne si elle permet une extraction immédiate de l'information nécessaire, c'est-à-dire de trouver la réponse à la question que l'observateur se pose en un seul regard, sans requérir un mouvement des yeux, un changement d'attention ou d'impliquer la mémoire » (***Andrienko & Andrienko, 2006 : 173***).

À l'instar du modèle de communication cartographique, le concept de visualisation cartographique concerne aussi bien la création d'une carte que son utilisation (***Kuvedžić Divjak & Lapaine, 2014***). Cela implique donc à la fois le concepteur et l'utilisateur. Ce constat n'est pas étonnant puisque « la communication a dominé la cartographie pendant près de deux décennies. Il était donc normal que toute tentative d'approche de la visualisation spatiale des données (facilitée par les cartes) doive tenir compte de la manière dont elle est liée à la communication (par la carte) » (***Kuvedžić Divjak & Lapaine, 2014, p. 3***). À travers la géovisualisation, la carte fait l'objet de nouvelles perspectives inscrites dans le développement des outils contemporains de visualisations géographique (***Dodge, 2014***). Cette « géovisualisation » redéfinit la façon de penser l'espace (***MacEachren, 1995***) et tend à réconcilier la cartographie et la géographie. Il s'agit par-là de fournir une idéation graphique d'une réalité (un lieu, un phénomène, etc.) en favorisant les processus cognitifs et perceptuels dans le traitement de l'information (***Dodge, 2014***). Ainsi « la capacité de provoquer des changements instantanés dans les cartes entraîne non seulement une différence quantitative dans le nombre de choses qu'un utilisateur peut rendre visibles, mais aussi une différence qualitative dans la façon dont les utilisateurs pensent, et, par conséquent, dans la façon dont les cartes fonctionnent comme des incitations à réflexion et prise de décision » (MacEachren & Kraak, 1997, p. 335). Malgré ce changement de paradigme cartographique, est-ce pour autant la fin de la communication cartographique ?

4.2.2. *Le continuum de la visualisation cartographique et de la communication*

MacEachren (***1995***) aborde la carte dans son utilisation plus que dans sa production. Cet auteur favorise un processus de recherche et d'exploration des données représentées à partir d'un espace tridimensionnel. Trois dimensions qui sont synthétisées dans la Figure 28. La première concerne l'étendue de l'audience :'l'usage de la carte peut varier d'une carte individuelle (usage personnel/privé) à une carte publique (diffusion grand public). La seconde montre le degré de découverte : l'utilisation d'une carte produit de nouvelles connaissances ou montre des choses déjà connues. La troisième concerne le degré d'interaction : l'utilisation de la carte implique un haut niveau d'interaction entre la carte et l'utilisateur.

Ce niveau d'interaction est dépendant des configurations possibles (de changements, de superposition, combinaisons possibles entre les données) qu'il est possible d'effectuer sur la carte. Ce dispositif conceptuel est utile afin de replacer le rôle de la carte et par définition de la construction de l'image visuelle.

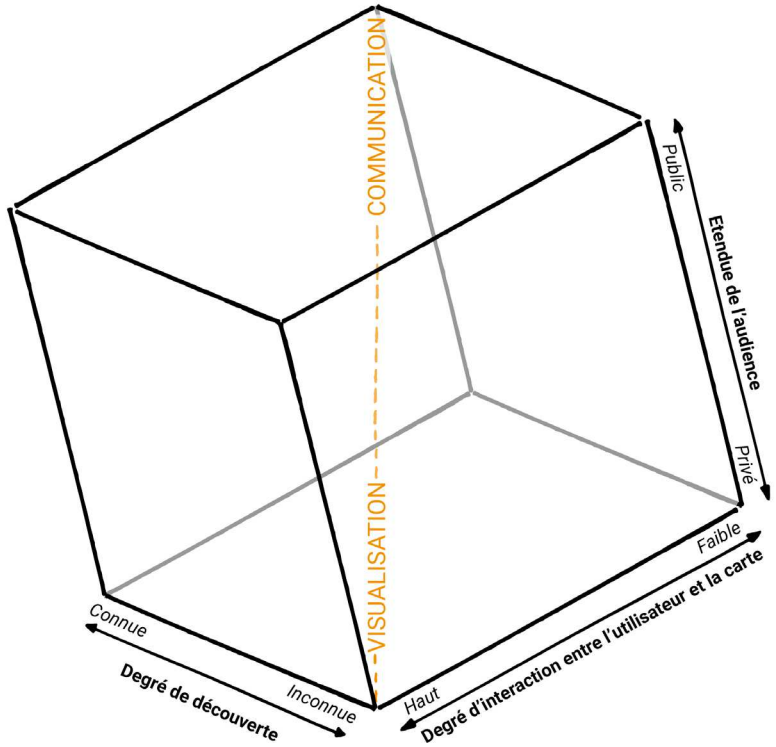


Figure 28 : Représentation de l'espace tridimensionnel de l'utilisation de la carte selon MacEachren (1994)

Dans son modèle, MacEachren nuance la visualisation et la communication selon leur utilisation. La construction des connaissances doit prendre en compte les deux principales fonctions de la carte, qui sont la visualisation des données et la présentation des données (***MacEachren, 1994***). Deux fonctions qui servent des buts bien distincts et déjà présents chez Bertin (***1977***). Elles permettent d'une part de « découvrir les relations que les données vont révéler » (graphique de traitement) et d'autre part « de fixer et de dire aux autres ce que l'on a découvert » (graphique de communication) (***Bertin, 1977, p. 22***).

Cependant un élément important ne ressort pas clairement à la vue de ce modèle. MacEachren ne considère pas la recherche sur la visualisation cartographique comme plus digne ou plus importante que la communication cartographique (***Kuvedžić Divjak & Lapaine, 2014***). La différenciation de ces deux modèles de représentation devient indistincte jusqu'à être de plus en plus diluée. Les deux concepts forment un continuum où le rôle et l'utilisation de la carte supportent tout processus de la construction de connaissances (***MacEachren & Kraak, 1997***). La communication fait partie intégrante de toute utilisation d'une carte, même si la visualisation en est l'objectif principal (***MacEachren, 1995***). Par conséquent, même la carte la plus banale destinée à la communication peut servir de moyen de visualisation mentale (***Kuvedžić Divjak & Lapaine, 2014***). En outre, la sophistication des systèmes d'information cartographique ouvre le champ de la géographie à de nouveaux applicatifs et de nouvelles propriétés sémiotiques et techniques qui renouvellent les réflexions portées sur la communication (***Plantin, 2014b***).

Pour conclure, la cartographie a subi de nombreuses mutations et ceci en lien étroit avec l'évolution de ces supports. De la cartographie traditionnelle à la géovisualisation, la carte n'est plus seulement une simple image, transmettant une information, mais également un moyen d'idéation, de découverte et d'exploration des données. L'héritage de ces recherches permet à la cartographie d'être un outil d'analyse de choix pour la pléthore d'utilisateurs qui la manie, même auprès des plus inexpérimentés.

4.2.3. Au-delà de la sémiologie de Bertin : les méthodes, les techniques et les outils d'aujourd'hui

L'appui théorique et technique des SIG dans les nouvelles méthodes cartographiques

Il est difficile de nier l'influence qu'a eue l'évolution technique sur la cartographie et ses paradigmes depuis le XXIe siècle (***Antoni et al., 2004***). À partir des années 70, le nombre grandissant de données et leur complexité poussent les chercheurs à explorer les possibilités de l'informatique à des fins de représentations graphiques (***Tukey, 1977***). Parmi ces solutions informatiques, les SIG sont devenus les outils privilégiés des cartographies et des géographes, mais également des informaticiens (***Plantin, 2014a***). Ils répondent à l'idée de « favoriser l'émergence d'hypothèses concernant l'organisation spatiale sous-jacente à la carte brute, au moyen de vues aux propriétés variées, mais néanmoins connues […]. L'utilisateur interrogeant ses données à travers les multiples vues à sa disposition, alternant les angles d'approches » (***Banos, 2001, p. 3***). Largement démocratisés depuis, les SIG sont devenus les principaux outils de la production cartographique. En plus d'automatiser les méthodes de conception cartographique, ils permettent « de rassembler des données de sources et de natures variées, d'en dériver de nouvelles informations par des procédés d'analyse spatiale et, surtout, de combiner les différents segments de la réalité géographique représentés dans une base de données spatiale pour évaluer simultanément, d'après des critères le plus souvent environnementaux, divers scénarios d'aménagement ou de développement, dans le but d'aider la prise de décision selon la logique de la gestion intégrée » (***Zanin, 2006b, p. 3***). Le portage de la carte traditionnelle (dessin) aux outils informatiques met en avant les nombreux points communs qu'il y a entre les SIG et la graphique de Bertin (***Bianchin, 2012***), à savoir : la construction d'une base de données dans l'objectif de les traiter sous formes graphiques à des fins de communication. Comme la carte traditionnelle, les SIG ne doivent

pas être perçus comme un simple outil d'affichage de données. En effet, à l'instar de celle-ci, ils n'apportent « pas d'autres innovations que l'automatisation des stockages et des données dans un temps réduit » (***Antoni et al., 2004***). Cependant, ils répondent aux mêmes objectifs de transmission et de manipulation de l'information (***Bertin, 2005***). Seuls les méthodes et les outils diffèrent.

À la différence de la carte traditionnelle, les SIG permettent de représenter les données de manières plus souples. Les données sont stockées, géoréférencées. Elles peuvent être mises à jour et visualisées sous la forme de cartes papier ou de tableaux statistiques (***Itami & Raulings, 1993***). Les possibilités de calcul permettent un grand nombre de traitements qui étaient impossibles auparavant, ou qui auraient nécessité beaucoup plus de temps. En plus d'exploiter les variables visuelles existantes, les SIG permettent de nouvelles représentations qui étaient alors impensables ou difficilement reproductibles. Ils permettent notamment de construire des variables de transparence (ou d'opacité), de foyer, de résolution ou encore la possibilité de décomposer des couleurs en luminosité, teinte et saturation introduites par MacEachren (***1995***). Ces systèmes permettent également de reproduire la variable de flou et de netteté de Pang (***2001***). Aujourd'hui, la cartographie numérique et les variables visuelles proposées par Bertin sont exploitées en bénéficiant des apports du web.

L'ère du Géoweb

Même si les prémices de la conversion cartographique au numérique remontent à plus d'une trentaine d'années, 2005 est une date clé pour ce que l'on appelle le géoweb (geospatialweb) (***Joliveau, 2011 ; Mericskay, 2016***). L'évolution de l'architecture des SIG a bénéficié d'une évolution particulièrement rapide avec le développement du *web mapping*, notamment celui de Google (google earth, google maps). Au même titre que les SIG, leurs capacités de stockage et de traitement, la mise en réseaux des bases de données, des applications et des utilisateurs ont eu d'importantes répercussions dans le domaine de l'information géographique (***Mericskay, 2016***). Les cartes deviennent accessibles et utiles à tous (***Joliveau, 2011***) et se déploient sur de nombreux supports (tablettes, smartphones, ordinateurs). La conception de la carte devient possible pour tous grâce à des outils équivalents à ceux des spécialistes (***Mericskay & Roche, 2011***). L'émergence de ce modèle a rapidement transformé l'usage que l'on pouvait avoir de l'information géographique qui était jusqu'alors considérée comme trop techniciste (***Plantin, 2014a***). Les données organisées sous la forme de couches d'informations géographiques peuvent être interrogées grâce à des interfaces de programmation (API) fournies par Google, Microsoft, etc. (***Bord, 2012; Joliveau, 2011***). Grâce à ces dernières, les développeurs informatiques peuvent construire des services de cartographie facilitant à la fois l'affichage d'une carte sur un site web, mais également l'intégration de données géolocalisées personnelles (statistiques, points et traces GPS, vidéos, images, etc.) (***Plantin, 2014a***). Outre la démocratisation et l'ouverture de la conception cartographique au grand public, le géoweb a conduit au développement de nouvelles méthodes et applications pour visualiser et parcourir les données (***Elwood, 2009; Joliveau, 2011; Mericskay, 2016***). Ainsi, à la différence des SIG classique, la cartographie web se concentre sur la visualisation et l'exploration sensorielle des données multimédias afin d'en faciliter la compréhension (***Kraak & Ormeling, 2020***). De fait, le géoweb, par ses propriétés de visualisation, de diffusion et de combinaison, se positionne comme un média à part entière (***Plantin, 2014a***). La carte devient

omniprésente à tel point que l'on peut parler d'un nouveau régime cartographique (*Joliveau et al., 2013*).

Cependant et à l'instar des SIG, la cartographie web contraint l'utilisateur à des modes de représentations prédéfinis (*Mericskay, 2016*). Sans connaissance approfondie, il devient difficile d'appliquer les règles de sémiologies graphiques, déjà lacunaires au sein du géoweb (*Griffin & Fabrikant, 2012*). Or, ces règles sont essentielles. Elles optimisent les dimensions de temps, de z (niveau de lecture), de sens (*Antoni et al., 2004*) qui alimentent l'interaction entre l'homme et la carte, et qui étaient jusqu'à lors contraintes par les limites des supports statiques. Outre l'affichage des données, ce sont surtout ces dimensions qui caractérisent l'analyse exploratoire des cartes(*Antoni et al., 2004*).

Les nouveaux outils de la géovisualisation, la cartographie dynamique

La géovisualisation offre aujourd'hui un ensemble d'outils permettant de remédier aux problématiques de la synoptique des constructions cartographiques. Face à la grande quantité de données géoréférencées, complexes et multidimensionnelles, ces outils prennent plusieurs formes :

- **La carte animée** : cette méthode reprend la collection de cartes que l'on retrouve au sein des supports statiques. Cette dernière met en évidence le changement d'un phénomène spatialisé selon des temporalités prédéfinies (*Arnaud & Davoine, 2009b*). L'animation de ce phénomène peut être réalisée par des variables de mouvements (*L'Hostis, 2003 ; Peterson, 1994*) telles que la localisation, la déformation et la création/superposition (*Cunty et al., 2017*). Elles sont basées sur les variables visuelles de Bertin (*Arnaud & Davoine, 2009b*) sur lesquelles peuvent être appliqués des effets (clignotement, traces visuelles) et/ou des animations (variation de valeur) (*Cunty et al., 2017*). Lorsqu'elle est numérique, la carte animée permet de réduire le nombre de cartes à produire, mais aussi la surcharge graphique qu'impliquerait la superposition des données sur un seul support. Il s'agit de l'animation automatique de données thématiques, selon une variable [t, t+1] sur un même support (*Antoni et al., 2004*) offrant l'avantage de révéler l'évolution de phénomènes spatiotemporels (*Arnaud & Davoine, 2009b*).

- **La carte interactive :** la dimension interactive implique un environnement dans lequel l'utilisateur peut se mouvoir et changer d'échelle de zoom (*Mericskay, 2016*). Ce dernier critère est important. La symbologie doit s'adapter à l'emprise cartographique. Les variables visuelles cartographiques comme la taille, la valeur, ou encore la forme qui servent à visualiser les données changent en fonction des seuils de zoom afin d'assurer un continuum sémiologique. Cette dimension interactive sous-entend également la possibilité d'ajouter, d'interagir et de contrôler les couches de données. On parle alors de « carte cliquable » (*Arnaud & Davoine, 2009a*). Une panoplie d'outils, comme les filtres, les fenêtres contextuelles guident l'utilisateur et lui permettent de choisir les données à afficher en fonction de ces besoins. Ce dernier a donc une place centrale au sein de la carte numérique (*Arnaud & Davoine, 2009a*).

- **La carte dynamique** : elle se traduit par un support interactif et animé (**Arnaud & Davoine, 2009a, 2009b**). On fait d'ailleurs la distinction entre une carte animée et une carte dynamique selon le niveau d'interactivité que l'utilisateur peut avoir avec le support (***Antoni et al., 2004***). À la différence de la première, la carte interactive permet à l'utilisateur de contrôler la variable temporelle grâce à un système de barre chronologique[22], de filtre, d'option de vitesse, etc. Comme pour la carte interactive, il s'agit de placer l'utilisateur dans une situation active permettant d'optimiser l'intégration de l'information.

- **La carte multimédia** : outre la variable temporelle, la cartographie interactive peut apporter de nouvelles dimensions visuelles et/ou sensorielles par l'intégration d'effets 3D, d'images, vidéos et son. On parle alors de cartographie multimédia (***Antoni et al., 2004***). Ce format est intéressant d'un point de vue immersif et exploratoire. Il permet d'intégrer des réalités géographiques (tangibles ou non tangibles) en faisant abstraction des formes géométriques. C'est le cas par exemple des représentations sonores du territoire (***Chételat, 2009***). Cette approche ouvre une nouvelle dimension à la carte et qui est complémentaire des variables visuelles. Dès lors, il est possible de jouer sur l'intensité, la fréquence ou encore la durée d'un son afin de créer une variable sonore (***Gaver, 1986; Krygier, 1994***). Le contenu multimédia est bien souvent intégré à la carte numérique sous la forme d'infobulles ou de fenêtres qui s'activent au clic de la souris. Il peut également se déclencher lors du survol de la souris sur une zone ou d'un symbole. Ces variables sensorielles peuvent également s'appliquer à la lecture d'une carte animée. Elles auront pour effet d'augmenter la scénarisation du support et l'ambiance dans laquelle sera plongé le lecteur.

Ainsi, la complexification des territoires et le besoin d'outils améliorant nos connaissances sur ces derniers s'accompagnent de manière corrélative d'une l'évolution des techniques de l'information géographique. Les modalités de représentation cartographique, déjà bouleversées par les SIG, évoluent de nouveau avec les apports du géoweb (***Mericskay, 2016***). De plus en plus interactive, la cartographie numérique fait passer l'utilisateur du simple lecteur au concepteur de données géoréférencées. Cependant, l'avènement du numérique ne veut pas forcément dire la mort du papier. La carte format papier continue d'exister et elle est encore bien ancrée dans le milieu opérationnel. Elle est facile à transporter, rapide à consulter (***Bord, 2012***) et surtout n'a pas le désavantage de dépendre d'une batterie et de mises à jour (***Cecconi, 2007***). Elle a néanmoins l'inconvénient d'être statique au regard des cartographies web et autres applications de géovisualisation. Encore aujourd'hui, une grande partie des portails cartographiques sont composés de cartes conçues sous le format papier (***Touya, 2017***). De plus, si les méthodes, les techniques et les outils ont évolué, la cartographie numérique renvoie aux mêmes problématiques, à savoir le fonctionnement de la perception visuelle et cognitive (***Mericskay, 2016***). Si le support s'oriente vers de nouvelles manières de gérer, visualiser, retranscrire l'information géographique, c'est bien souvent au détriment des fondamentaux de la construction cartographique (***Crampton et al., 2013***)

[22] *https://geodata.univ-montp3.fr/web-app/carte-mortalite/*

4.3. Application au cadre de la communication opérationnelle en gestion de crise

4.3.1. L'implication de la recherche à des fins d'optimisation et d'intégration

L'état de l'art concernant notre champ d'application a montré qu'un grand nombre d'images, de représentations graphiques et de cartes étaient moins performantes pour communiquer et visualiser efficacement des informations (***Kuvedžić Divjak & Lapaine, 2014***). En gestion de crise, de nombreuses cartes, spécialement conçues pour la communication et l'intervention, produites et utilisées par les différentes communautés (interne ou externe à la gestion de crise), présentent des défauts d'ordre cartographique (***Kuvedžić Divjak & Lapaine, 2014***). Cependant, l'implication de la recherche dans la cartographie de crise porte encore très largement sur les aspects techniques permettant d'améliorer l'efficacité et le renforcement de la capacité de réponse à la crise (***Luchetti et al., 2017 ; Voigt et al., 2016***). C'est notamment le cas pour les cartographies *post*-catastrophes. Leur production, à l'instar des cartographies de crise (***Giroux, 2012***), n'est jamais absolument fiable (cf. supra 3.3.1). L'acquisition et le traitement des données ne peuvent être clairement validés que par des phases de terrain. Les recherches s'orientent donc principalement sur la capacité d'analyse, de traitement, d'estimation des niveaux de dommages (***Klett, 2011***) et le gain des nouvelles technologies OT sur la qualité et la rapidité d'acquisition des données.

Ainsi, les limites, les exigences et les défis de la représentation visuelle n'ont pas encore été systématiquement pris en compte et appliqués dans la cartographie utile à la gestion de crise. Cependant, des problèmes ont déjà été identifiés. On retrouve par exemple l'absence de standard dans la symbolisation cartographique, le type d'informations affichées ou encore des cartes visuellement surchargées qui nuisent à la lisibilité des informations essentielles (***Akella, 2009; Dymon, 2003; Kuveždić Divjak & Lapaine, 2018***). Gueben-Venière (***2019***) montre que ces problématiques peuvent se traduire par l'abandon ou la sous-utilisation paradoxale de la carte alors même que celle-ci est jugée comme essentielle. L'auteure constate par exemple que l'usage de la carte lors de la crue de la Seine en 2016 a été relayé au second plan, au profit d'autres moyens informationnels comme le téléphone ou les mails. Elle met en avant que cette question du décalage entre les besoins et l'utilisation de la carte est décrite dans plusieurs champs de la recherche. L'auteure se réfère d'une part « aux possibilités offertes par les objets et les besoins inhérents à la situation » (***Adrot, 2017, p. 8***), et d'autre part à l'insuffisance des cartes à intégrer la complexité des dynamiques des risques observés (***November et al., 2010***), à cartographier la catastrophe, à rendre visible les risques et par conséquent à hiérarchiser les actions en phase d'urgence (***Petersen, 2017***). Ainsi, malgré son positionnement central dans le dispositif de la gestion de crise industrielle et naturelle (***Le Bourhis, 2007; Martinais, 2007***), la carte se confronte traditionnellement à des problématiques d'incompréhension des besoins, de mauvaises utilisations, d'un manque de co-construction (***Caron & Roche, 2001***) ou encore de l'insuffisance de retours d'expérience utilisateur. Qu'il s'agisse de cartes traditionnelles sur papier ou de cartes numériques et/ou interactives, la prise en compte des exigences de la communication et de la visualisation cartographique est déterminante.

Elle l'est d'autant plus quand la lecture d'une carte intervient en situation de crise. Négliger ces exigences communicationnelles et visuelles peut conduire à une lisibilité amoindrie et à une mauvaise interprétation des informations affichées et donc menacer le processus de communication opérationnelle.

En conséquence, la recherche s'est jusqu'alors axée progressivement sur le développement d'approches cartographiques pour représenter les objets, les phénomènes. Ces approches se focalisent tant sur le plan technique, social et cognitif qu'à travers des évaluations de leur potentiel par des expériences utilisateurs (***Čerba et al., 2017; Kunz & Hurni, 2011; Robinson et al., 2013; Seipel & Lim, 2017; Svatonova & Kolejka, 2017***). Parmi ces travaux, on peut citer la représentation des phénomènes naturels (***Kunz & Hurni, 2011; Meyer et al., 2012***), la symbolisation cartographique (***Akella, 2009; Palka, 2015; Péroche, 2016; Staněk et al., 2010***) ou encore des couleurs (***Seipel & Lim, 2017***) utilisées dans les cartes de risque et de crise. Les travaux de Kuveždić Divjak et Lapaine (***2018***) se concentrent plus particulièrement sur la nomenclature des cartes utiles durant ou immédiatement après un événement. Ils déconstruisent plus d'une centaine de cartes selon trois éléments : le fond de carte, les éléments géométriques et graphiques de base ainsi que l'utilisation des couleurs. Sur cette base, ils produisent une analyse itérative des erreurs qui entravent la communication de l'information. Ils proposent ainsi des lignes directrices, simples et transférables, pour concevoir des cartes correctes et compréhensibles pour tous les participants à la gestion de crise. Plus rares sont les travaux axés sur les cartographies de dommages *post*-catastrophes. Klett (***2011***), en plus de fournir une méthodologie de traitement de la donnée spatiale, propose cependant une méthode de représentation thématique des dommages. Il s'inspire de la méthode des blocs urbains afin d'optimiser la lecture des données quantitatives. Cependant, cette représentation n'a pas fait pas l'objet de tests utilisateurs.

Il est donc possible d'en conclure, qu'en plus des premières problématiques rencontrées (cf. supra 3.3), la carte *post*-catastrophe souffre d'un manque de retours d'expériences à la fois de ces modes de conception cartographique et des utilisateurs. Un constat qui s'explique en partie par leur développement récent leur récente diffusion dans l'histoire cartographique expliquant le manque de recherche à ce sujet. Par ailleurs, les entretiens menés auprès d'acteurs locaux et régionaux de la gestion de crise par les membres de l'équipe du projet ANR TIREX dans le cadre du retour d'expérience faisant suite à l'ouragan Irma (2017), démontre que ces cartes n'ont pas eu d'applications opérationnelles. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer ce manque d'utilisation : l'incertitude liée aux méthodes d'acquisition, les problèmes de diversité des modes de représentations cartographiques ou encore d'efficacité des modes de visualisation de la donnée. Ces cartes souffrent naturellement des mêmes lacunes observées dans la cartographie traditionnelle. À cela se rajoutent des conditions particulières d'utilisation qui peuvent rapidement rendre très exigeantes la communication et l'interprétation des données. En partant de cela, nous proposons une synthèse afin d'établir l'état des différentes contraintes qui pénalisent la communication des cartographies *post*-catastrophes.

4.3.2. La cartographie des dommages post-catastrophes comme outil de communication opérationnelle

Les contraintes de la cartographie rapide *post*-catastrophes dans le cadre de la communication opérationnelle

Un schéma empirique (Figure 29), reprenant le modèle de communication cartographique de Koláčný (***1969***) (cf. supra 4.1.2) permet de mieux aborder ces contraintes. L'un des premiers ajouts par rapport à ce modèle initial est celui des différentes réalités que l'on retrouve chez les concepteurs et les utilisateurs. Ces réalités traduisent le niveau de connaissance, d'expérience et d'interaction des individus en rapport avec la réalité géographique qui exprime un contexte territorial. Elles sont propres à chaque individu et intègrent de nombreux facteurs subjectifs (connaissance du territoire, du phénomène, etc.), mais également liés à la localisation. Dans le cas de la cartographie des dommages *post*-catastrophes, les concepteurs acquièrent, analyse et conçoivent les cartes à distance, loin des zones touchées par un l'événement naturel ou technologique contrairement aux acteurs locaux présent sur place.

Du point de vue des concepteurs, la divergence des réalités s'explique de prime abord par des facteurs d'observation de la donnée (**1**). Il s'agit par exemple de la capacité ou non à réaliser une comparaison diachronique. Le type d'aléa influence la capacité des observateurs à analyser ou non les dommages tout comme la qualité de l'image et les conditions météorologiques. A cela se rajoute également l'expérience, la perception ou tout autre critère subjectif qui conditionnent les facultés des cartographes lors de l'analyse par photo-interprétation. Dans notre cas de figure et comme cela est visible à l'échelle internationale, chaque service de cartographie rapide dispose de ces propres standards, connaissances empiriques, capacités, conditions de travail et buts. Cela se retrouve finalement au niveau des grilles d'évaluation des dommages ou encore des méthodes de traitement utilisées (automatique, semi-automatique, etc.).

Chacun opère une transformation intellectuelle de l'information observée à partir de ses connaissances, but, capacités, etc. (contenu de l'esprit du cartographe) et y applique son propre langage cartographique (**3**). Les observations de Kerle et Hoffman (***2013***) démontrent que ces processus ont pour conséquence la création d'un jeu de cartes (**4**) dont les choix techniques concernant les processus d'abstraction, projection et symbologie, sont différents.

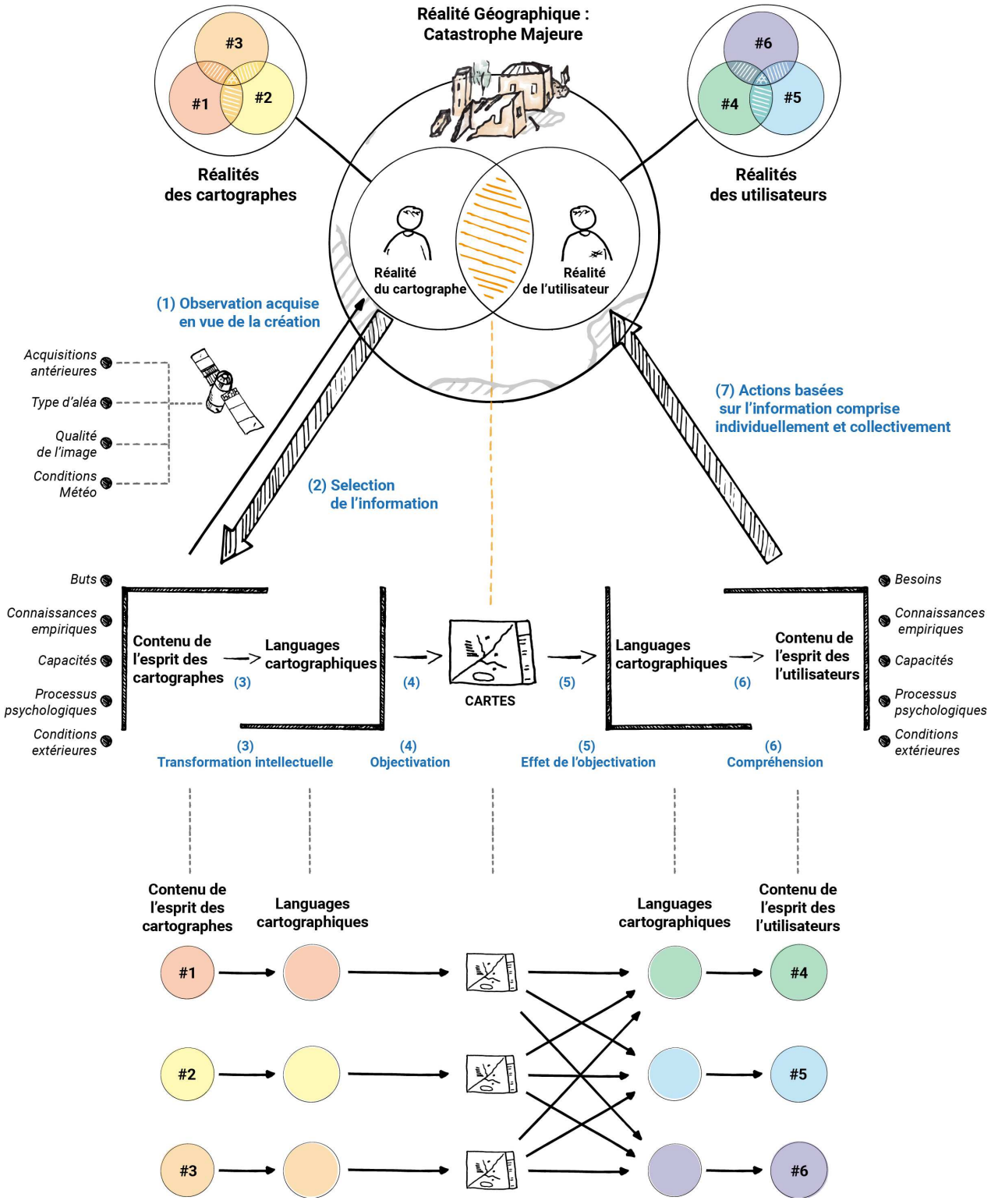


Figure 29 : Les contraintes de la cartographie des dommages post-catastrophes dans la communication opérationnelle

Du point de vue des utilisateurs, cette transmission d'informations se confronte aux connaissances cartographiques du lecteur (**5**) et à plusieurs facteurs contraignants (**6**). La fréquence à laquelle l'utilisateur va être confronté à une catastrophe majeure et *in fine* à ce type de carte. Le temps d'utilisation de ce type de carte qui est étroitement lié aux conditions et à l'environnement de travail de l'utilisateur. Dans notre cas, il se caractérise par la mise sous tension généralisée à l'égard de la situation d'urgence. La diversité des acteurs implique également un niveau d'expérience cartographique différent. Pour certains, la gestion de crise est souvent plus théorique que pratique. Le niveau d'expertise relatif à son utilisation doit donc être pris en compte puisqu'il implique une mobilisation plus restreinte de leur reconnaissance visuelle (mémoire à long terme). Un autre point important concerne la connaissance du territoire dans un contexte de catastrophe « majeure ». Cette dernière implique des connaissances différentes d'une part à l'échelle des acteurs locaux, mais également auprès des acteurs situés en dehors des frontières de ce même territoire. Pour les acteurs sur site, la connaissance des vulnérabilités territoriales va directement influencer leur interprétation des conséquences de la catastrophe. Dans le meilleur des cas, ils connaissent les événements historiques et donc l'emprise potentielle de l'aléa. Ils peuvent également anticiper les zones de dommages les plus importants, qu'ils déduiront d'une typologie du bâti ou d'une population plus sensible et exposée. Cependant, qu'en est-il des autres acteurs dont l'interprétation de l'espace dépend de connaissances extérieures qu'ils doivent intégrer sur des temps limités ? Dans ce cas particulier, la connaissance et la perception de l'information ne seront pas les mêmes. Ainsi, l'ensemble de ces critères couplés à la diversité des productions cartographiques engendrent chez les utilisateurs une divergence des réalités interprétées. Cette dernière aura pour conséquence de nuire à l'utilité de ces cartes, notamment auprès des actions basées sur l'information comprise individuellement et collectivement (**7**).

À partir d'entretiens réalisés dans le cadre d'exercices de crise, Gueben-Venière (***2019***) met en avant trois fonctions de la carte : fournir une vue d'ensemble de la situation utile et être un outil d'aide la décision, et à la légitimation. Les besoins d'informations fiables, cohérentes et claires deviennent alors une nécessité face à l'accroissement des incertitudes nées de l'ampleur de l'événement, des conditions de travail (stress, temps compté, etc.) et des capacités des utilisateurs. En outre, comme la crise mobilise de nombreux acteurs, de différents milieux, la communication transversale doit permettre le développement d'une conscience mutuelle (***Bigley & Roberts, 2001; Saoutal et al., 2014; Weick & Roberts, 1993***). La carte doit ainsi « contribuer à la construction collective » (***Gueben-Venière, 2019, p. 6***) d'une histoire de la catastrophe dont la narration emprunte le même langage cartographique. Pour la cartographie rapide *post*-catastrophes, ce langage est celui des dommages, des conséquences du séisme ou de l'ouragan sur les bâtiments, les réseaux. Malgré la diversité annoncée, les cartes ont en commun de traiter le plus souvent la même information. Ainsi, pour être efficaces, il est nécessaire d'optimiser leur capacité graphique à favoriser une perception et une compréhension commune de cette information thématique. Et parce que la crise implique de nombreux acteurs qui interviennent à différents échelons de sa gestion, ce langage cartographique doit prendre en compte la notion d'échelle de travail.

La notion d'échelle en gestion de crise

Raisonner à travers les échelles est inhérent à toutes réflexions géographiques. Cette approche est bien souvent « un signe de reconnaissance des géographes » (***Lussault & Lévy, 2003***). Mais pourquoi exactement ? Comme l'énonce Bertin dans son ouvrage (***1967***), les questions pertinentes sont souvent posées aux niveaux moyens et supérieurs. En outre, la carte qui illustre un phénomène à de petites échelles ne répond pas aux mêmes exigences qu'une carte qui détaille un secteur à des échelles plus grandes. La première cherche à répondre à des besoins de comparaison externe, de pointage des phénomènes susceptibles d'améliorer nos connaissances du territoire tandis que la seconde sert à préciser localement les critères explicatifs, amplificateurs ou réducteur de ce que l'on observe aux petites échelles. Ce fonctionnement des échelles est identique en gestion de crise. En fonction du type d'aléa et de son envergure, la crise s'inscrit à plusieurs échelles géographiques. Naturellement, ces dimensions spatiales peuvent influencer la nécessité de travailler à certaines échelles cartographiques. Dans le cas d'un séisme ou d'une tempête par exemple, les zones touchées sont étendues. Pour les représenter dans leur ensemble, il est donc essentiel de travailler aux petites échelles. Inversement, des événements plus restreints, comme les avalanches, sont représentés sur des cartes à grandes échelles. Cependant, comme le soulignent Kuveždić Divjak & Lapaine (***2018***), l'échelle cartographique n'est pas uniquement déterminée par la nature de l'aléa. Elle dépend également des utilisateurs, des échelles de décision et du rôle que doit tenir la carte pour répondre à leurs besoins. Les cartographies proposées par le service EMS de Copernicus sont par exemple déclinées à plusieurs échelles : fines (1 :5 000), intermédiaires (1 :25 000) et larges (1 :100 000), afin de répondre à ces différents besoins[23]. Par ailleurs, les services de cartographie *post*-catastrophes ont peu développé les interfaces de géovisualisation précédemment citées (cf. supra 4.2.3). Ils livrent leurs productions aux formats d'impressions PDF, JPEG, PNG. Des produits numériques livrables sous SIG sont également fournis via des serveurs de base de données (type FTP). Les plateformes cartographiques, comme celle de la CHARTE[24] ou de Copernicus EMS[25], permettent uniquement de faire l'inventaire des différentes activations et acquisition satellitaire sans proposer de visualisations thématiques en ligne. L'UNOSAT Map live[26] propose néanmoins des représentations dynamiques, où il est possible de zoomer et dézoomer selon ses besoins. Cependant, les données affichées au moyen d'implantations ponctuelles souffrent d'un manque de lisibilité aux petites échelles.

[23] *https://emergency.copernicus.eu/mapping/ems/how-use-service*
[24] *https://cgt.disasterscharter.org/en*
[25] *https://emergency.copernicus.eu/mapping/map-of-activations-rapid#zoom=6&lat=17.18439&lon=-66.66317&layers=BT00*
[26] *https://www.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=3356c7f1659a4282a08fa188208036d7*

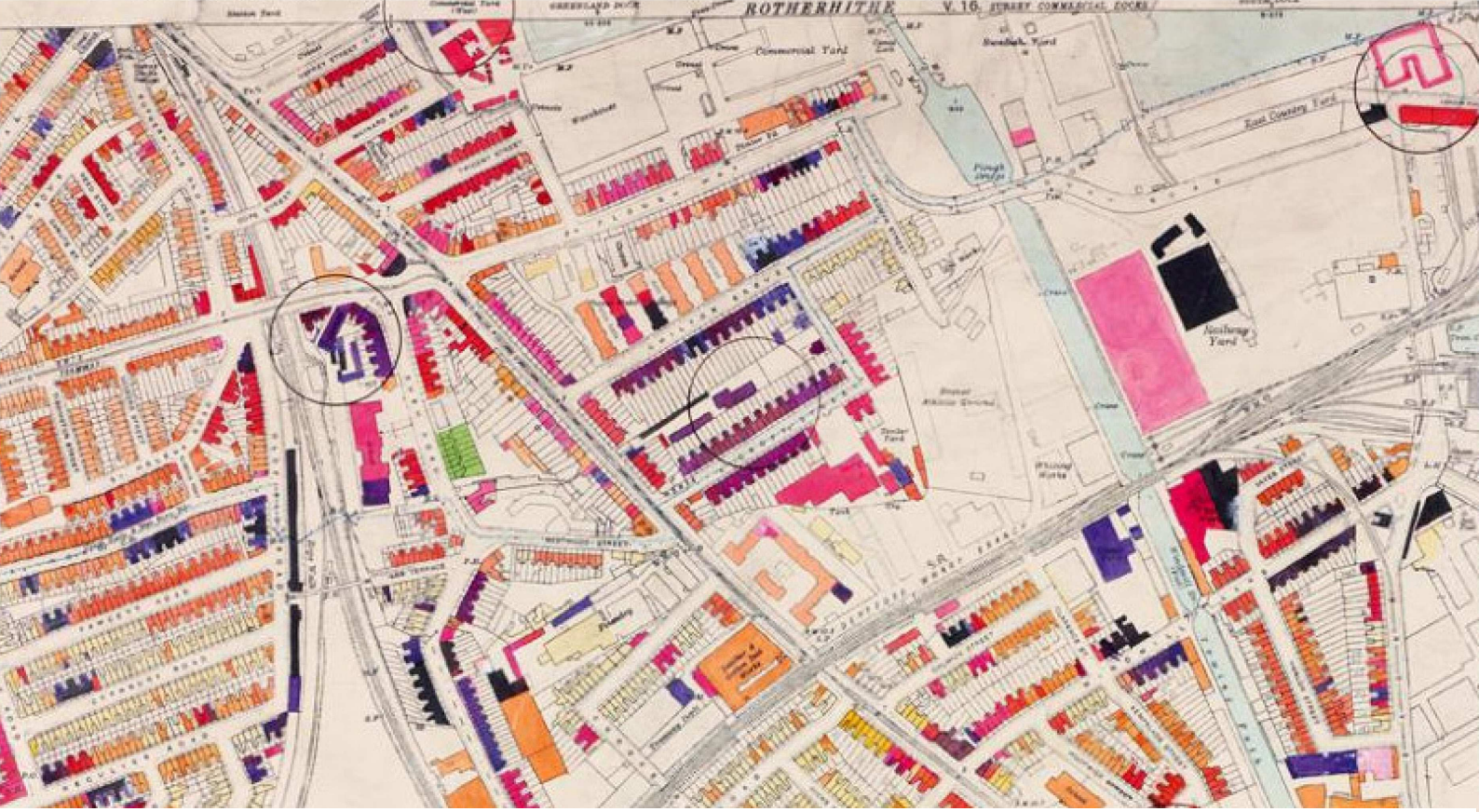
Conclusion intermédiaire

La carte est un outil d'aide à la décision apparu très tôt au sein des activités de l'homme. Par ses capacités à représenter l'espace et ses réalités (tangibles ou non), la carte s'est progressivement implantée dans de nombreuses disciplines. Elle est particulièrement bien adoptée par le milieu de la gestion des risques majeurs. Ce dernier s'appuie sur cet outil pour visualiser et interpréter les différentes composantes du risque (aléa-enjeux-vulnérabilité et résilience) et de les communiquer. En gestion de crise, ce support soutient la communication opérationnelle (transmission, partage, interaction) et l'aide à la décision par la création des connaissances situationnelles importantes pour la réduction des conséquences négatives d'une catastrophe. La cartographie rapide *post*-catastrophes est de plus en plus visible parmi les déclinaisons des cartes utiles à la gestion de crise. Apparue il y a 20 ans, elle répond aux besoins d'accroitre la coordination internationale dans la réponse aux catastrophes naturelles et/ou technologiques. Notre recherche se focalise sur l'un des produits phares proposés par ces services : la cartographie des dommages *post*-catastrophes. Grâce à leur capacité de couverture, de réactualisation et de délais d'intervention, ces produits génériques représentent une aide précieuse pour les gestionnaires de crises. Cependant, l'état de l'art établi montre également que ces services sont soumis à certaines contraintes. Bien que les techniques d'acquisition et de traitement se développent, il existe encore une part d'incertitude dans la donnée qui est livrée. Les décalages entre l'évaluation de terrain et l'évaluation hors-sol sont mis en évidence dès la comparaison de ces jeux de données. Ils s'expliquent par des facteurs techniques et humains qui se traduisent aujourd'hui par des propositions comme l'adaptation de l'échelle d'intensité des dommages intégrant la classe « possiblement endommagé ».

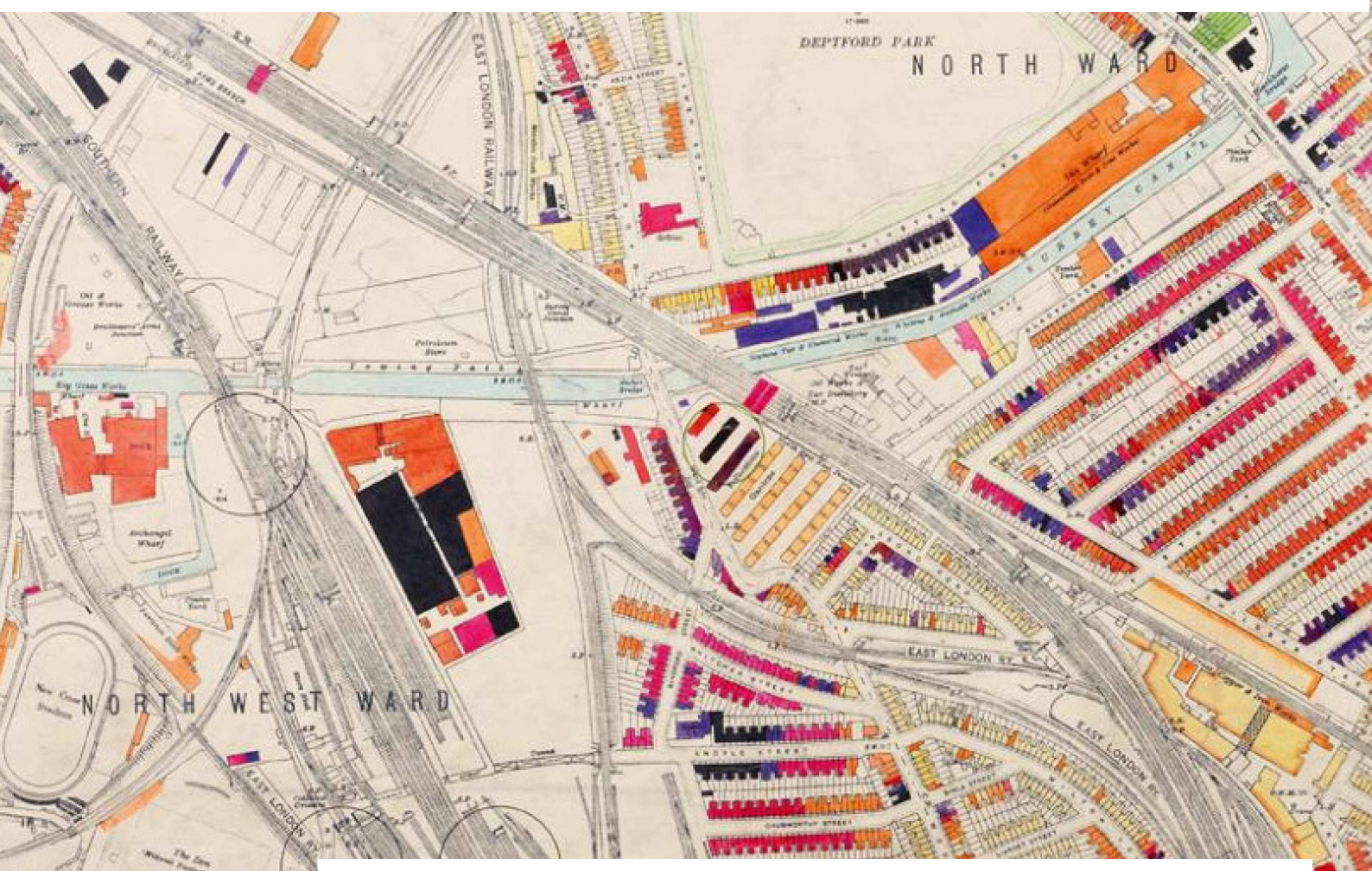
D'autres problématiques sont soulevées, telles que la diversité des productions cartographiques *post*-catastrophes observées lors d'événements de grandes ampleurs et de son impact sur la gestion de crise. Bien que ces questions soulevées par les chercheurs n'aient pas directement abouti à des études approfondies permettant d'analyser les conséquences sur l'interprétation des utilisateurs, elles s'appuient sur les changements de paradigme qui ont influencé la façon dont le cartographe et le géographe regardent et conçoivent la carte. Comme toute représentation cartographique, l'efficacité de ces cartes dépend de leur capacité à être lue, comprise, mémorisée par une gamme grandissante d'utilisateurs. De plus, la gestion de crise est un contexte particulier, qui instaure des conditions d'utilisation peu favorables au décryptage d'images complexes. Elle nécessite également que tous les acteurs impliqués aient une interprétation similaire de la situation et ceci à toutes les échelles de travail. La sémiologie graphique de Bertin (***Bertin, 1967***) offre la possibilité d'optimiser cette efficacité en réduisant le « coût mental » (***Zipf, 1932, 1946***) nécessaire à la perception visuelle et cognitive de l'information (***Lambert & Zanin, 2016; Zanin, 2006a***).

Une construction efficace « requiert un temps d'observation plus court qu'une autre construction » (***Bertin, 1967, p. 139***) afin de fournir la réponse souhaitée. Une définition que l'on retrouve également chez Tufte (***1983***). Cette efficacité présuppose donc que les critères de quantité, de qualité et de temps soient optimisés. Des critères qui sont repris par MacEachren (***MacEachren, 1995***), mais pour qui, seule la qualité (l'interprétation) définit l'efficacité d'une représentation visuelle. Il s'agit de deux définitions parmi tant d'autres, mais qui ont en commun de s'interroger sur l'approche graphique de la carte (***Dhee, 2013***). Ainsi, la géovisualisation appliquée à la gestion de crise offre un terrain d'applications idéal pour les règles de sémiologie graphiques.

Ainsi, la pluralité des acteurs qui gravite autour de la gestion de crise incite les chercheurs à développer des méthodes optimisant la représentation visuelle des cartes de risques et de crises. La cartographie *post*-catastrophes est un objet d'étude qui est encore peu investigué. Cette étude s'inscrit dans la continuité de ces réflexions sur la base d'une méthodologie organisée en plusieurs étapes. Notre recherche a pour objectif de construire un premier retour d'expérience cartographique au sein des productions *post*-catastrophes et de proposer un modèle de visualisation optimisant les capacités d'interprétation en situation de crise.



PARTIE 2 : LES CARTES DE DOMMAGES : ÉTUDE DES STYLES CARTOGRAPHIQUES ET CONSÉQUENCES DE LA DIVERSITÉ DES MODES DE REPRÉSENTATION



Extrait des cartes de dommages de l'ouvrage « The London County Council : Bomb damage maps 1939-1945 » par Laurence Ward (2015)

Partie 2 : Les cartes de dommages, étude des styles cartographiques et conséquences de la diversité des modes de représentation

Cette seconde partie est intégrée dans un continuum méthodologique (Figure 30) visant dans un premier temps à approfondir nos connaissances sur les représentations cartographiques des dommages *post*-catastrophes. L'état de l'art nous a appris que la construction d'une carte peut être perçue comme un acte singulier dont le résultat final dépendra des choix sémiologiques et de *design* de leur concepteur. De ces paramètres et choix, il en dépendra la lecture de la carte plus ou moins facilitée par la reconnaissance de signes distinctifs qui caractérisent *in fine* un style cartographique. Compte tenu de la diversité annoncée des cartographies de dommages *post*-catastrophes, il convient de réaliser un premier état des lieux cartographique. Il s'agit de répondre aux questions suivantes : existe-t-il des signatures caractéristiques communes qui favorisent la reconnaissance de ces cartes ? Qu'est-ce qui caractérise la diversité cartographique observée ?

Ce travail permet également d'analyser les problèmes qui découlent d'un manque de consensus international sur la production de ces cartes. Par la suite, nous proposons une expérimentation visant à analyser les répercussions d'une telle diversité des modes de représentations cartographiques sur l'interprétation d'un groupe d'utilisateurs. Pour cela, nous reprenons le cas particulier du séisme de Haïti (2010). Cette approche permet d'une part d'estimer les niveaux de convergence et de divergence d'interprétation lors d'une analyse individuelle et collective de plusieurs cartes, mais également, de mettre en avant la capacité de lecture, l'incertitude et les préférences des participants. L'approfondissement des connaissances, à la fois sur les modes de conception et les capacités d'interprétation, pour ce type de cartes a pour objectif final de déduire les facteurs qui permettront l'amélioration de leur communication cartographique.

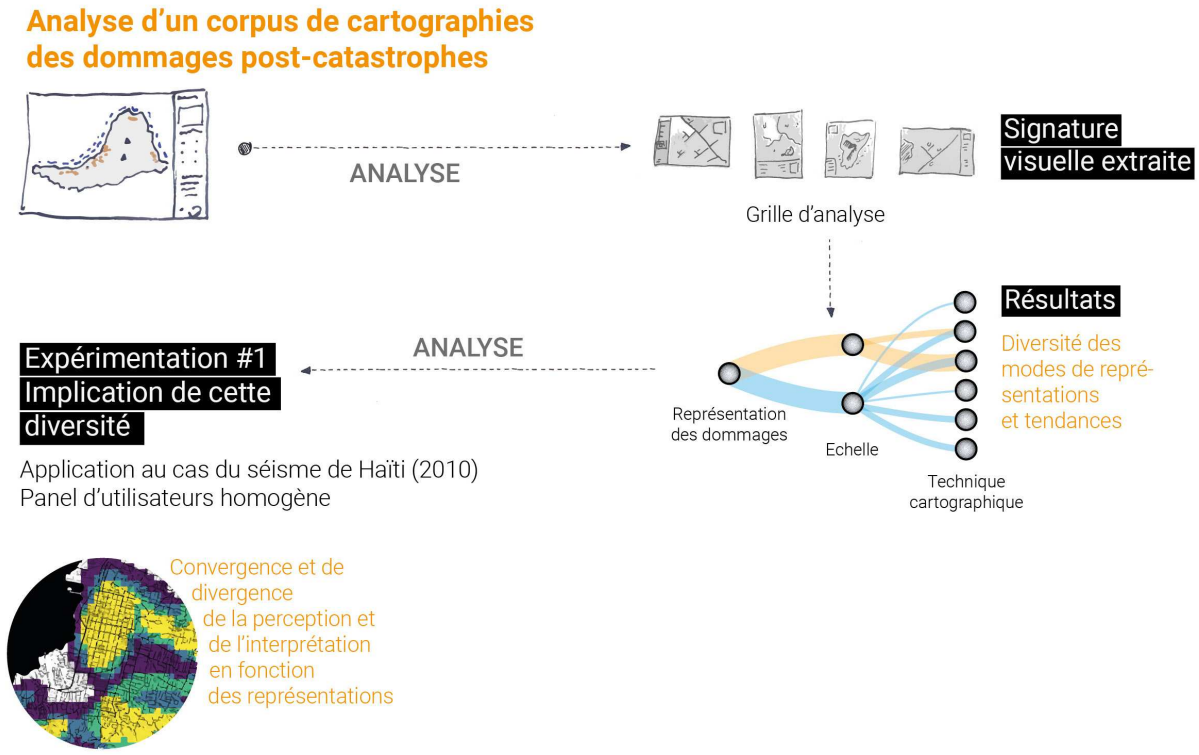


Figure 30 : Première phase de la démarche méthodologique

Chapitre 5 : Définition d'un style cartographique de la carte de dommages *post*-catastrophes

5.1. Concepts clés pour l'interprétation d'une famille cartographique

5.1.1. Signature visuelle et saillances graphiques

La signature visuelle

Pour définir le principe de signature visuelle, nous nous appuyons sur les travaux de Ory (***2016***) et plus largement des mécanismes perceptifs et cognitifs (cf. supra 4.1.1) qui entrent en jeu dans l'interprétation d'une carte (***Arnheim, 1976 ; Board & Taylor, 1977 ; Griffin & Fabrikant, 2012 ; Guelke, 1979 ; MacEachren, 1995 ; Matlin, 2002***). Selon ces principes, il existe des critères graphiques reconnaissables parmi d'autres grâce à leur récurrence au sein des cartes et à leur combinaison avec des propriétés visuelles qui nous sont subjectives. Ils sont régis par des processus perceptifs et cognitifs qui permettent à l'utilisateur de visualiser et d'interpréter correctement l'espace géographique concerné et les thématiques cartographiées (***Ory, 2016***). Ainsi, cette définition fait appel au fonctionnement de l'œil et de la mémoire, que Ory (***2016***) exploite à travers une expérimentation (Figure 31). Il part du principe que face à un panel de cartes, les participants se confrontent dans un premier temps aux signes graphiques. Ils constituent des stimuli qui vont se structurer sous la forme de signatures visuelles perçues (processus pré-attentif). Ils seront stockés dans la mémoire à court terme (mémoire de travail) et comparés avec les connaissances antérieures qui constituent la base de données mémorielle de l'utilisateur (mémoire à long terme). Ory (***2016***) parle alors de « signatures visuelles mémorisées ». Ainsi, la similarité entre une signature visuelle perçue et une autre mémorisée permet la reconnaissance d'un type de carte et des éléments qui la composent. Cette similarité conditionne également la distinction entre deux types de cartes au sein d'un même ensemble thématique. Appliquée au cas de la carte topographique, cette analyse met en évidence l'existence de styles bien distincts entre les cartes IGN et Swisstopo (***Ory, 2016***). Le processus de reconnaissance d'un style cartographique déployé par Ory (***2016***) se base ainsi sur les concepts de saillances des signes graphiques qui vont être perçus (processus pré-attentif) et assimilés par la mémoire de travail et la mémoire à long terme.

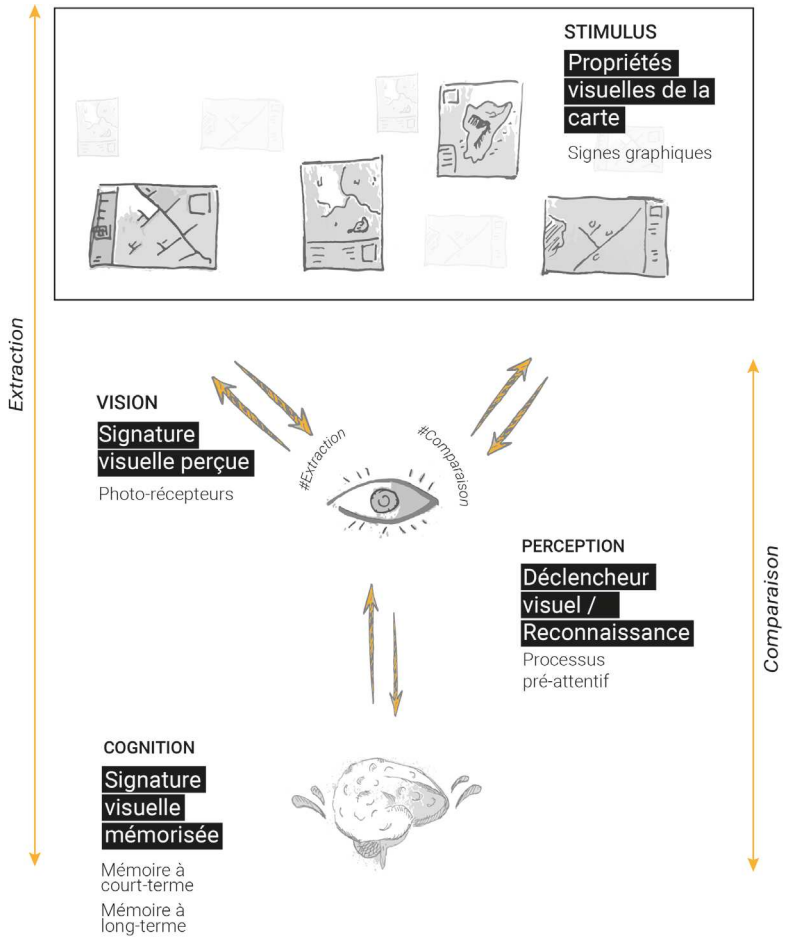


Figure 31 : Processus de reconnaissance d'un style cartographique par l'expérience utilisateur (d'après Ory, 2016 modifié Candela, 2021)

La saillance des signes graphiques

Il est essentiel de prendre en compte les caractères prédominants et distinctifs d'une signature visuelle. Ces deux critères se caractérisent par la capacité de perception visuelle et leur niveau de saillance des signes graphiques qui la composent. Ory (***2016***) définit ces deux propriétés comme suit :

- « Le caractère prédominant est conditionné par une itération constante de certaines représentations graphiques et d'éléments bien spécifiques à un type de carte ». Dans le cas des cartes de dommages, cela peut se traduire par exemple par un style de représentation des dommages, ou bien d'un choix d'échelle constant. Il s'agit d'une similarité intemporelle que l'on pourra retrouver depuis le début de la diffusion de ces cartes. Par ailleurs c'est cette répétition qui enclenche le processus de reconnaissance visuelle (mémoire à long terme) de la part de l'utilisateur.

- « Le caractère distinctif est conditionné par la saillance visuelle, c'est-à-dire par les propriétés qui vont visuellement ressortir de la carte et que l'on retrouvera à travers les couleurs, les formes ou encore les typographies. Ce critère définit également les signes qui seront distinctifs d'une conception cartographique à une autre. Ce caractère distinctif peut être constitué d'un signe isolé ou bien d'un groupe de signes. Pour ce dernier cas, cette distinction sera le résultat de leur combinaison et qui n'existera pas autrement ».

Ainsi, les signes graphiques prédominants permettent de faire la différence entre une carte des dommages et une carte topographique par exemple. Les signes distinctifs permettent, quant à eux, de faire la différence entre deux producteurs ou encore deux gammes de cartes des dommages. Ces propriétés visuelles sont donc inhérentes à une signature visuelle. Elles sont par définition réexploitées par les utilisateurs pour créer des contenus similaires. Pour illustrer nos propos, voici les résultats d'une expérimentation menée auprès d'une promotion du Master 1 spécialisé en Gestion des Catastrophes et des Risques Naturels (M1GCRN2017) de l'Université de Paul-Valéry à Montpellier en 2017. Cette promotion, composée de 26 étudiants majoritairement géographes, devait réaliser une cartographie du glissement de terrain de Oso survenu le 22 mars 2014 dans le comté de Snohomish, état de Washington aux USA (***Wartman et al., 2016***). Les étudiants étaient libres d'utiliser des choix graphiques et des éléments à intégrer à leur carte à leur guise. Cette expérimentation avait pour but de mettre en exergue une vision commune de la représentation graphique de la carte des dommages *post*-événement. L'extraction des éléments graphiques des 26 cartes produites nous a permis de dégager des signes prédominants. Les cartes comportaient toutes des éléments sur le phénomène impliqué (aléa), ses conséquences, et sur les éléments topographiques/anthropiques du secteur (bâtiments et axes de communication, etc.). Ces signes ont été décomposés par thèmes :

- La représentation des axes routiers intacts et touchés par l'événement
- La représentation du bâti intact et touché par l'événement
- La représentation du réseau hydrographique et les modifications causées par le glissement de terrain sur son tracé
- La représentation de l'aléa principal
- La représentation de l'occupation du sol et la topographie
- La géologie et les éléments divers (présence d'un mémorial par exemple)

La Figure 32 présente les résultats de l'extraction de chacune de ces composantes. Certaines tendances ont pu être dégagées. Les axes de communication principaux et secondaires touchés par le mouvement de terrain ont été représentés par des couleurs chaudes, principalement le rouge, l'orange et le jaune. Des couleurs ont été utilisées également pour les bâtiments touchés, contrastant avec les bâtiments intacts représentés en noirs. À noter qu'une grande partie des axes routiers principaux intacts a également été représentée par des couleurs chaudes. Ce choix laisse penser qu'il s'agit d'un héritage des cartes topographiques IGN. En plus des conséquences du mouvement de terrain, nous notons également qu'une attention particulière a été portée sur la représentation de ce dernier. Là encore, les couleurs utilisées sont principalement chaudes.

Cette expérimentation a permis d'illustrer en partie les composantes cartographiques et graphiques qui sont intégrées de manière individuelle et spontanée par des étudiants géographes. Lorsque ces composantes individuelles présentent des propriétés communes alors il est possible de parler de famille cartographique. Ces propriétés peuvent être apparentées à des signes constitutifs d'une famille cartographique susceptibles d'être présents dans les productions *post*-catastrophes fournies par les services spécialisés d'observation de la terre.

	Représentation axes routiers :	Impactés :	Représentation bâti :	Impactés :	Représentation hydro :	Impactés :	Représentation Aléa :	Occupation du sol : Topographie :	Géologie : Divers :
A. A	Route principale WA530 Route secondaire Chemin	Par le glissement de terrain Voix de communication inaccessible Par l'inondation Voix de communication inondée	Bâti	Par le glissement de terrain Maison détruite Par l'inondation Maison inondée	Tracé hydrographique 2014	Par le glissement de terrain Tracé hydrographique 2013	Ligne de crête 2013 Ligne d'arrachement Tête de glissement Sens du glissement en fonction de l'inclinaison des arbres Zone de débris	Iisohypse (5m)	
A. M	Route principale Route secondaire	Sans distinction Route principale coupée Route secondaire impactée Route rasée	Bâti post glissement	Sans distinction Bâti disparu	Rivière 2013 Petite rivière	Sans distinction Zone inondee Alluvions	Niche d'arrachement Tête de glissement Corps de glissement Chenal de boue Boue	Forêt Prairie	Alluvions Pont
B. S	State Route 530 Northeast route secondaire résidentielle sentier	Par le glissement de terrain portion de la State Route 530 détruite ou endommagée par le glissement portion des routes secondaires résidentielles détruites ou endommagées par le glissement route de contournement mise en place suite au glissement	bâti non impacté par le phénomène	Par le glissement de terrain bâti submergé par les matériaux déplacés lors du glissement et / ou inondé par le lac de barrage	Rollins creek chenal de la North Fork Stillaguamish river avant l'évènement	Par le glissement de terrain zone exhondée suite au barrage du cours d'eau par les matériaux accumulés dans son lit par le glissement	extension spatiale du glissement-coulée ligne de crête antérieure au phénomène escarpement visible en 2013 indiquant la cicatrice d'arrachement d'un ancien 1 niche d'ablation, zone de départ des matériaux avec dérivelès importants 2 blocs, corps et pied du glissement, zone de transport et d'accumulation avec topographie perturbée et îlots de masses forestières intactes provenant de l'amont 3 zone d'accumulation de coulées bouseuses, topographie plus lisse et matériaux plus fins	végétation arborée dense prairie et lande	dépôt alluvial récent et ancien dépôt sableux du Pléistocène dépôt fluvio-glaciaire argilo-sablo-limoneux du Pléistocène faille géologique ligne électrique à haute tension
B. V	Route principale Route secondaire	Par le glissement de terrain Route rasée Route principale coupée Route secondaire coupée Route de substitution	Bâti	Par le glissement de terrain Bâti détruit	Ancien chenal du cours d'eau Cours d'eau temporaire	Par le glissement de terrain Chenal en eau turbide Retenue d'eau	Surface d'arrachement Niche d'arrachement Tête du glissement Corps du glissement Coulée de boue	Forêt Prairie et lande	Faille Alluvion Dépôt glaciaire Sable Sable fin, limon, argile Ligne électrique
B. P	Routes principales Routes residentielles	Par le glissement de terrain Routes principales détruites Routes résidentielles détruites	Bâtiments [24]	Par le glissement de terrain Bâtiments [49]	Lit moyen en 2013 Cours d'eau mineur	Sans distinction Lit moyen en 2014	Niche d'arrachement Tête de glissement Surface d'arrachement Glissement rotationnel Surface recouverte	Isohypses de 10m	memorial
C. M	Route résidentielle Route secondaire Autre route Chemin	Sans distinction Route détruite	Bâti en 2013	Sans distinction Bâti en 2014	Rivière en 2013	Sans distinction Rivière en 2014 Zone inondée par rupture de barrage	Extension de la coulée Niche d'arrachement Sens de la coulée	Végétation	
C. E	Route principale Route secondaire	Sans distinction Routes disparues Chemin détérioré Partie de la route principale impraticable Partie de la route secondaire impraticable Route reconstruite		Sans distinction Batiments disparus	Lit du cours d'eau en 2013	Sans distinction Lit du cours d'eau en 2014	Niche d'arrachement principale Niche d'arrachement secondaire Zone d'éboulement Zone de débris	Plaine Forêt Courbe de niveau	Mémorial
F. J	Route principale intacte Chemin intact	Par le glissement de terrain Route principale endommagée Chemin rasé	Bâti intact	Par le glissement de terrain Bâtiment détruit	Stillaguamish river en 2013 Affluent non touché	Par le glissement de terrain Stillaguamish river en 2014	Niche de décrochement Zone de coulée de boue destructrice Sens du mouvement	Espace boisé intact / peu touché	Infrastructure de secours / temporelle Mémorial
H. Y	Route principale Route secondaire	Sans distinction Route principale endommagée Route secondaire endommagée Bifurcation Route rasée Chemin endomagée	Bâti	Sans distinction Bâti touché	Ancien cours d'eau (2013)	Sans distinction Nouveau cours d'eau (2014) Barrage naturel	Mouvement de glissement Niche d'arrachement Zone de glissement Ebouli Dépot	Forêt Plaine Courbes de niveaux	Mémorial
I. M	Route principale Route élargie Route secondaire	Par le glissement de terrain Route rasée Route principale coupée Route secondaire coupée chemin endomagée	Bâti intact Ne figure pas dans la légende	Par le glissement de terrain Batiments disparus	Cours d'eau 2013	Sans distinction Cours d'eau 2014 Barrage naturel	Niche d'arrachement principale Niche d'arrachement secondaire Zone de dépots	Foret Plaine Courbe de niveau	Mémorial
J. B	Route principale Route secondaire Nouvelle route	Par le glissement de terrain Route principale coupée Route secondaire coupée Route détruite chemin endomagée	Bâti	Par le glissement de terrain Bâti détruit	Cours d'eau en 2013	Par le glissement de terrain Cours d'eau en 2014	Niche d'arrachement principale Niche d'arrachement secondaire Zone de débris	Plaine Forêt Courbe de niveau (10m)	Mémorial
L. M	Route nationale Route résidentielle Chemin Sentier	Par le glissement de terrain Dommage matériel Route de contournement	Bâti	Par le glissement de terrain Dommage matériel	Tracé de la rivière (08/2013) Ruisseau	Par le glissement de terrain Tracé de la rivière (06/2014) Zone inondée par le barrage	Corniche d'arrachement Tête de glissement Extension spatiale Direction	Végétation Ancienne corniche d'arrachement Isohypse (10m)	Pont Mémorial
L. C	Route principale Chemin	Sans distinction Routes détruites Route principale détruite	Bâti peu/non endommagé	Sans distinction Bâti détruit Bâti construit post glissement	Cours d'eau en Septembre 2013 Ruisseau	Sans distinction Cours d'eau en Mai 2014 Zone inondée suite au glissement	Tête d'arrachement Niche de décrochement Zone d'impact du glissement	Forêt	
M. A	Route secondaire Route principale	Par le glissement Route coupée Route secondaire disparus	Bâti existant	Par le glissement Bâti disparu	Cours d'eau 2013	Sans distinction Cours d'eau 2014	Cicatrice d'arrachement Tête de glissement Zone de débris Bourrelet Frontal	Forêt Plaine	
M. P	Route secondaire Chemin	Par le glissement Route secondaire coupée durant le glissement Chemin coupé durant le glissement Route rasée	Bâtiment ayant résisté	Par le glissement Bâtiment détruit	Ruisseau Lit mineur du cours d'eau pré glissement	Par le glissement Lit mineur du cours d'eau post glissement Zone inondée à la suite du glissement	Limite du glissement de terrain Ancienne tête d'escarpement (pré glissement) Niche d'arrachement principale Sens du glissement	Forêt Prairie / Surface agricole / Terrain privé Isohypses (30 m.)	Mémorial
M. C	Route principale Route secondaire Sentier	Par le glissement Route créée après glissement Route détruite	Bâti non détruit	Par le glissement Bâti disparu	Lit mineur cours d'eau Rivière	Par le glissement Lit mineur du cours d'eau et zone d'inondation Formation d'une retenue d'eau	Tête de glissement Décrochement Plateau Zone d'arrachement Corps du glissement Masse glissée	Plaine et lande Forêt	Pont
M. V	Route fédérale Route secondaire Piste	Par le glissement Route rasée	Bâti actuel	Par le glissement Bâti rasé	Cours d'eau mineur Lit mineur de la rivière avant le glissement	Par le glissement Zone inondée (effet induit : barrage) Lit mineur actuel de la rivière	Cicatrice d'arrachement Tête de glissement Zone d'impact du glissement	Forêt Prairie Isohypses (10m)	Pont Mémorial
N. L	Route principale Route secondaire	Sans distinction Route principale endommagée par le glissement Route secondaire endommagée par le glissement	Bâti présent après le glissement	Sans distinction Bâti détruit par le glissement	Ancien lit du cours d'eau	Sans distinction Nouveau lit du cours d'eau	Glissement de terrain Corniche d'arrachement	Isohypse	
P. R	Route secondaire Route	Sans distinction Route coupée	Maison	Sans distinction Bâtiment disparu	Cours d'eau Rivière (2013)	Sans distinction Rivière (2014)	Cicatrice d'arrachement Tête de glissement Corps de glissement Pied de glissement	Forêt Plaine	Cable électrique OSO Slide Memorial
P. M	Route secondaire Route résidentielle	Par le glissement Route détruite	Bâti	Par le glissement Bâti détruit	Rivière 2013	Par le glissement Rivière 2014 zone inondée induit par le barrage	Zone du glissement Tête de glissement Corniche d'arrachement Ancienne corniche	Plaine Végétation Isohypse (10m)	Pont Mémorial
R. A	Route principale Route secondaire	Par le glissement Route secondaire affectée Route principale affectée	Bâti en 2016	Par le glissement Bâti en 2013	Cours d'eau	Par le glissement Lit mineur en 2013 Lit mineur en 2016 Inondation induite (rupture barrage)	Coulée de boue Contre pente Couronne d'arrachement Direction de glissement Ravinement	Végétation Isohypse (10m)	Mémorial
S. N	Route secondaire Chemin Sentier	Par le glissement Route endommagée voire rasée	Bâti	Par le glissement Bâti endommagé voire rasé	Cours d'eau	Par le glissement Tracé de la rivière en 2013 Tracé de la rivière en 2014 Transport de boue Zone inondée	Niche d'arrachement Corps du glissement Direction	Végétation Terre Isohypse (10m)	Pont
T. L		Par le glissement Route principale endommagée Route secondaire endommagée Chemin endommagé	Bâti Non renseigné en légende	Par le glissement Bâti détruit	Ancien lit mineur	Par le glissement Nouveau lit mineur Zone inondée	Direction de la coulée Corniche d'arrachement Frontière du glissement	Isohypse (30m)	Mémorial
V. T	State road 530 Route	Sans distinction Route détruite	Bâti	Sans distinction Bâti détruit	Ancien tracé du lit mineur	Sans distinction Nouveau tracé lit mineur Innondation	Niche d'arrachement Tête de glissement Par le glissement Masse déplacée Espace recouvert	Forêt Prairie Isohypse (10 m)	mémorial
V. L	route nationale 530 route de terre	Par le glissement portion de route recouverte par les matériaux route agrandie pour permettre le contournement du glissement surface du plateau emportée dans le glissement (tête de glissement)	bâti	Par le glissement bâti détruit par les matériaux du glissement (habitants tués/blessés)	chenal du cours d'eau principal avant le glissement cours d'eau secondaire	Par le glissement retenue d'eau formée par les matériaux du glissement chenal post glissement	niche d'arrachement tête de glissement avec arbres inclinés dans le sens du glissemen corps de glissement surface atteinte par la coulée boueuse	forêt prairie ou lande	plateau meuble érodé rebord de plateau post glissement matériaux superficiels meubles : dépôts alluviaux pont
V. M	Route principale Route secondaire	Par le glissement Route disparue	Bâti intact	Par le glissement Bâti disparu	Rivière "Stillaguamish" / 2013	Par le glissement Rivière "Stillaguamish" / 2014	Sens du mouvement de masse Niche d'arrachement Glissement de terrain Dépôt	Foret Plaine	Memorial

Figure 32 : Tableau de signes graphiques extraits des 26 cartes traitant de la catastrophe d'Oso, Washington (USA)

5.1.2. *Famille cartographique*

Finalement, le concept de propriétés communes est fondamental lorsqu'on parle de famille cartographique. Qu'il soit défini à travers les éléments de légendes (***Christophe, 2012***) ou encore de signatures visuelles reconnaissables (***Ory, 2016***), il aboutit à une reconnaissance par l'utilisateur du style cartographique visualisé. L'image mentale qui se construit à la suite des expériences cartographiques représente un modèle cognitif qui conserve les caractéristiques essentielles de l'objet. De ce fait, nous partons du principe que la mémoire d'un individu collecte des informations visuelles grâce à la répétition et la saillance de certaines représentations. Cette image mentale est le fruit d'une abstraction subjective qui, par l'analyse cumulée d'un groupe de personnes, donne naissance à une représentation abstraite d'un style de carte. Il s'agit donc d'une représentation interne schématisée dont la mémorisation sera également dépendante du contexte dans lequel la carte est manipulée. Notons que ce contexte peut être primordial pour définir les éléments cartographiques qui sont retenus. C'est le cas par exemple des cartes de dommages *post*-catastrophes qui sont principalement utilisées durant des périodes de gestion de crise plus ou moins longues. En fonction de ce contexte, des tâches à accomplir avec ces cartes, mais également des choix graphiques des producteurs, certains signes graphiques marqueront plus intensément la mémoire. Ils seront en théorie plus représentatifs que d'autres afin de déterminer le type de carte et afin de savoir qui en est le producteur.

5.2. Extraction de signes grahiques d'un échantillon de cartes des dommages *post*-catastrophes

5.2.1. *Analyse des signatures visuelles à partir de l'observation cartographique*

L'état de l'art a mis en exergue la diversité des représentations cartographiques *post*-catastrophes. Celle-ci est principalement liée au manque de consensus international, notamment pour les cartes produites dans le cadre de la CHARTE. Pourtant, nous sommes partis de l'hypothèse qu'il était possible de faire ressortir certaines tendances quant à la construction de ces cartes ; influencées notamment par les besoins spécifiques des gestionnaires de crise. Premièrement, existe-t-il des caractéristiques visuelles communes qui définissent une carte des dommages *post*-catastrophes ? Deuxièmement existe-t-il des différences graphiques au sein même de ce type de cartes qui pourraient être caractériser selon le concepteur, le type d'aléa (phénomènes naturels) ou encore l'échelle de visualisation ?

Notre approche a consisté à faire la synthèse des propriétés visuelles des cartes de dommages *post*-catastrophes. Elle a cependant été différente des travaux de Ory (***2016***), car elle n'a pas placé directement les utilisateurs au cœur de la définition d'un style cartographique. Dans notre cas, les cartes de dommages *post*-catastrophes sont relativement récentes avec une diffusion qui débute dans les années 2000, mais pleinement exploitée à partir de 2010. Le panel d'utilisateurs et la mobilisation de ces cartes sont donc limités à un contexte bien particulier et cela contraint par définition cette représentation

collective. Nous avons ainsi décidé de développer une approche mobilisant, non pas l'utilisateur et sa mémoire, mais une grille d'analyse cartographique multicritère et une base de données (Figure 33).

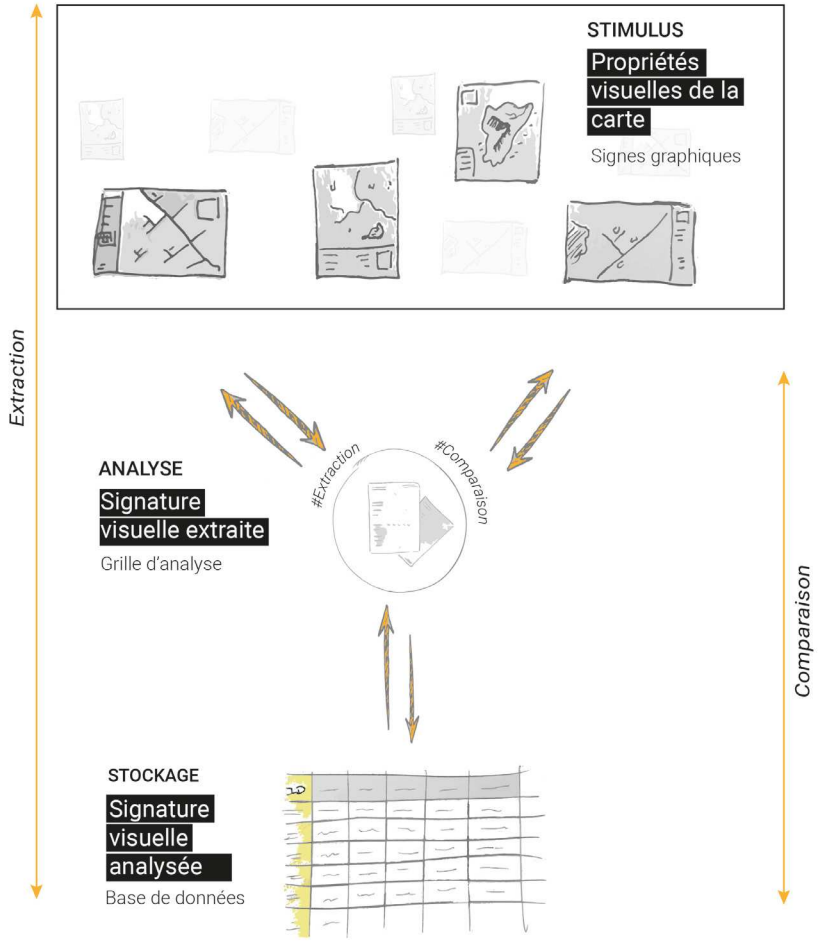


Figure 33 : Processus de la reconnaissance d'un style cartographique au moyen d'une grille d'analyse cartographique multicritère

Dans cette approche, la signature visuelle a été le résultat d'une synthèse des signes graphiques extraits à partir d'un ensemble de cartographies thématiques, dans notre cas les cartes de dommages *post*-catastrophes. Les signes graphiques étaient constitués des stimuli (propriétés visuelles) qui se structuraient sous la forme de signatures visuelles extraites grâce à une grille d'analyse multicritères décomposant la carte selon des critères de premiers plans (représentation de l'aléa, des dommages, etc.) et de second plan (point d'intérêt, topographie, etc.). Ces signes graphiques ont été stockés dans une base de données tout en intégrant la subjectivité humaine du diagnostiqueur. Cette grille a permis la collecte de chacun des éléments constitutifs d'une carte des dommages et la comparaison des différentes cartes entre elles. Ce diagnostic a abouti *in fine* à l'analyse des itérations graphiques permettant de définir une famille cartographique. Ce résultat a permis d'estimer des liens de dépendance entre les tâches à accomplir, l'échelle de travail et les représentations cartographiques.

En résumé, les signes visuels caractéristiques d'une famille cartographique ont été définis par la synthèse statistique d'un ensemble de cartes. En lien avec l'approche de Ory (***2016***), nous nous sommes basés sur la diversité cartographique qu'a énoncé Kerle (***2013***) après le séisme de Haïti (2010) pour proposer une approche statistique des signatures visuelles. Dans la section suivante, nous détaillons l'approche suivie pour l'identification des signes graphiques qui caractérisent les cartes de dommages *post*-catastrophes.

5.2.2. *Approche générale pour l'étude des cartes de dommages post-catastrophes*

Notre méthode d'analyse s'est inspirée de plusieurs approches dont celles menées par Péroche (**2016**) et Girres et al., (**2018**) pour les plans d'évacuations tsunami. Leurs méthodes se sont fondées sur l'extraction d'objets cartographiques et éléments de légende présents dans les plans d'évacuations tsunami. Elles ont notamment permis la construction d'une charte cartographique optimisée et adaptée à un large panel d'utilisateurs en s'accordant sur l'itération de signes graphiques prépondérants et distinctifs au sein de ces cartes.

Cette première étude a soulevé de nombreuses questions : doit-on analyser la carte dans son ensemble ou bien se focaliser sur certains éléments constitutifs ? Il est également possible de réaliser les deux simultanément. De plus, quels sont les éléments qui seront analysés et à quelles échelles, petite ou grande ? Dans un souci d'exhaustivité, chaque carte de dommages a été analysée sous ces deux angles d'approche. Un premier passage a permis l'analyse globale de la carte. Cette étape a consisté à fournir les premières informations qui ont aiguillé l'appartenance d'un style cartographique à un concepteur, un type d'aléa ou encore une échelle de diffusion. Nous avons indiqué la charge visuelle ressentie engendrée par l'image cartographique. Cet examen a été complété par une analyse de la composition de la légende, à savoir : le niveau de détail, d'organisation ou encore la présence d'informations complémentaires. Un second passage a consisté à extraire les signes candidats à la caractérisation de ce type de carte. Les cartes ont été analysées en se focalisant sur les différents éléments graphiques de la carte qui sont observables en premier plan (données thématiques) et en second plan (fond de carte).

Cette analyse en deux temps a été réalisée par le biais d'une grille d'analyse construite spécifiquement pour cette étude. Cette dernière est détaillée dans la section suivante. Ce travail a été répété pour différentes cartes de dommages produites à la suite de catastrophes et dont l'échantillonnage est détaillé dans la section suivante.

5.2.3. *Construction d'une grille d'analyse cartographique*

Comme énoncé préalablement, la construction de la grille d'analyse cartographique a été inspiré par les travaux de Péroche (**2016**) et Girres *et al.,* (**2018**). Ces derniers ont notamment analysé et répertorié des cartes en langues étrangères Les principaux résultats ont mis en avant une diversité des méthodes d'élaboration des plans d'évacuation. Comme ils l'ont décrit, il n'existait pas vraiment de norme ni même de consensus, mais uniquement des guides de bonnes pratiques pour établir ce type de plans. La diversité sémiologique, graphique et informationnelle qui en est ressortie a largement été alimentée par la démocratisation à la fois des outils de conceptions cartographiques et des productions en elles-mêmes. Pour ces chercheurs, l'étude graphique de ces cartes n'a pas eu pour but premier de faire ressortir de bonnes ou de mauvaises pratiques, mais d'en illustrer les nombreuses différences et points de convergence. Le but a été de construire leur propre charte graphique. Cette dernière a pu être

généralisée ensuite sur plusieurs projets opérationnels de planification des évacuations préventive face au risque tsunami dans la Caraïbe (cf. site web EXPLOIT[27]).

La grille d'analyse a été adaptée à notre projet afin de mettre l'accent sur l'extraction des signes graphiques qui composent à la fois les informations thématiques (les dommages) et les données de second plan (fond de carte). Cette analyse a été réalisé afin d'être transposable à d'autres types de cartes. Seuls les critères d'évaluation de l'information de premier plan pourront évoluer d'une thématique à l'autre. Le processus décrit en Figure 33 a permis de développer un outil de comparaison utile à la définition d'un style cartographique. Il a rendu également possible l'identification des critères de qualités des cartes produites. Les cartes échantillonnées ont ainsi été décortiquées à selon plusieurs grands critères, eux-mêmes divisés en sous-critères, présentés ci-dessous.

Critère #1 : Présentation de la carte

Ce critère regroupait les données sur le titre, les concepteurs, les aires de représentations, etc., visibles dès la première lecture de la carte.

- **L'identification de la carte échantillonnée :**

Tableau 6 : Critères d'identification de la carte recensée

Type de carte	Titre de la carte	Producteurs	Date de conception	Pays
Aire régionale	Localité	Commanditaire	Échelle cartographique	

Une première tâche a consisté à identifier le type de carte analysée, *c.à.d.* s'il s'agissait d'une cartographie rapide (réalisée peu de temps après la catastrophe) ou non. Les données concernant l'organisme de prescription et le commanditaire ont été identifiées à partir des logos visibles sur les supports cartographiques. Ces informations ont permis d'établir la traçabilité de la carte. Si elles n'étaient pas visibles sur la carte, une recherche complémentaire était nécessaire, notamment auprès des plateformes de diffusion. Cette première lecture a également pris en compte le pays, l'emprise spatiale et la localité d'intervention qui ont été définis en fonction des seuils de zoom cartographique. Ces données ont été utiles pour le traitement et le tri général à l'échelle de l'échantillon. La date de conception a été relevé afin d'assurer le suivi de l'évolution graphique de ces cartes dans le temps.

[27] Site EXPLOIT : *https://exploit.univ-montp3.fr/2-projet-exploit.html*

Critère #2 : Caractéristiques générales des éléments graphiques et textuelles

Le critère #2 a eu pour but d'observer la variabilité des signes graphiques et des niveaux de précisions sur les données thématiques de ce type de carte, déclinées à travers l'information sur l'aléa (phénomène naturel) et les dommages.

- **L'information sur l'aléa :**

Dans un premier temps, la grille détaillait les informations concernant l'(les) aléa(s) qui a (ont) été à l'origine de la carte.

Tableau 7 : Critères d'identification de l'information sur l'(les) aléa(s)

Type d'aléa	Nombre d'aléas	Date de l'événement	Date d'acquisition
Représentation de l'aléa		Type de nomenclature	Code couleur

Dans certains cas, les cartes de dommages pouvaient représenter un ou plusieurs aléas. Des inondations par exemple ont pu s'accompagner d'une série de mouvements de terrain. Un séisme a pu être à l'origine d'un tsunami, etc. Ces informations ont été collectées et retranscrites dans la grille, complétées par la date de l'événement en question et celle de l'acquisition des images ayant permis l'évaluation des dommages. Par la suite, les caractéristiques chromatiques et sémiologiques des aléas ont également été renseignées. Cette partie a consisté à l'extraction du type de représentations (figurés ponctuels, surfaciques, linéaires) et de nomenclatures (graduées, catégorisées, etc.) utilisées pour renseigner ces informations. Ce travail a permis entre autres d'analyser l'influence du type d'aléa sur la représentation des dommages. Les niveaux dommages estimés après une inondation, par exemple, ont été plus difficiles à hiérarchiser que ceux causés par un séisme.

- **Style et nomenclature des dommages :**

Cette partie de la grille s'intéressait aux entités visuelles utilisées pour décrire les dommages. Ces dernières sont importantes. Elles représentaient l'information de premier plan spécifique aux cartes de dommages *post*-catastrophes.

Il s'agissait ici des méthodes d'agrégation et des spécificités de la charte graphique employées pour la représentation des dommages. Comme pour l'aléa, le type de dommages cartographiés pouvait prendre plusieurs formes (dommages aux bâtiments indifférenciés, sites industriels, réseaux de communication). Ce niveau d'information dépendait du choix des concepteurs, mais également des possibilités d'analyses offertes par les images satellitaires. Dans la mesure où il s'agissait de dommages physiques, l'analyse cartographique ne se limitait aux seuls impacts sur les bâtiments. Ces informations étaient affichées sous la forme d'entités visuelles surfaciques, ponctuelles et linéaires. Ces types d'implantations se traduisaient par l'application de différentes techniques cartographiques qui influencent le type d'information (quantitative/qualitative) affichée. Elles intégraient ou non des variables de couleurs ou de valeurs que nous avons également pris soin de renseigner. En plus du type d'implantation, l'analyse a porté sur la nomenclature des dommages et le niveau de précision de la

légende. Pour finir, la densité, le niveau d'abstraction et la sélectivité des données sur les dommages ont été renseignés.

Tableau 8 : Critères d'extraction des signes graphiques des dommages représentés

Surfacique	Ponctuel	Linéaire
Éléments représentés * nombre de représentations de ce type		
Type d'information (quantitative/qualitative) * nombre de représentations de ce type		
Typologie des dommages * nombre de représentations de ce type		
Nombre de classes * nombre de représentations de ce type		
Colorimétrie		
Densité	Abstraction	Sélectivité

Critère #3 : Informations de second plan et habillage de la carte

Cette phase du diagnostic visuel s'intéressait aux éléments de second plan constituant l'image cartographique.

- **<u>Informations de second plan et habillage de la carte :</u>**

Les éléments de second plan se composaient des routes, bâtiments, ponts, réseaux hydrographiques. Une analyse préliminaire a démontré que les cartes *post*-catastrophes renseignaient quelques fois des éléments se rapportant à la gestion de crise, tels que les points de ravitaillement (carburant), les zones de regroupements, les ERP, etc. Ces informations peuvent se montrer précieuses pour les forces de secours qui souhaitent cibler rapidement les secteurs les plus touchés et organiser leur réponse opérationnelle. La grille a donc permis de signaler la présence ou non de telles informations Elle renseigne également l'existence ou non de toponymes qui améliorent le repérage sur la carte.

Tableau 9 : Informations de second plan et habillage de la carte

Réseaux routiers	Ponts	Bâtiments	Réseaux hydrographiques
Eléments se rapportant à la gestion de crise		Toponymes	
Relief / topographie	Informations complémentaires		
Fond de carte	Logo d'identification des commanditaires et/ou partenaires		

Les autres critères concernaient les éléments de mise en page spécifiques à chaque concepteur de carte. Cela se traduisait par exemple par la présence d'informations complémentaires (données statistiques sur les dommages, sur l'événement), l'identification des concepteurs, etc. La présence d'une carte de situation de la zone analysée, par rapport à son territoire régional ou national, a également été prise en compte. Autre point important, l'échelle de la carte a permis de définir le niveau d'appréciation géographique (commune, quartier, îles, etc.) et la résolution de la donnée. Le type de fond de carte (image satellitaire, administratif, etc.) et la présence du relief ont également été renseignés. Ils transmettaient des informations sur l'occupation des sols et la topographie du théâtre des opérations de secours.

Critère #4 : les données textuelles

Pour finir, nous avons passé en revue les éléments de légende qui doivent être présents dans toutes productions cartographiques. Par définition, la légende a permis d'apprécier les éléments structurants, la thématique abordée et d'évaluer le contenu des informations en faisant le lien entre le lecteur et l'image cartographique.

- **Texte et légende :**

Tableau 10 : Analyse du texte et de la légende

Existence d'une légende	Niveau de détail global du texte	Nombre de langues

Dans notre cas, l'analyse a pris en compte l'existence ou non d'une légende. Son contenu a ensuite été analysé. Plus une légende était précise et complète, plus sa capacité opérationnelle a été jugée comme forte. Les informations pouvaient être détaillées avec des données issues du recensement des dommages et des statistiques. Le nombre de langues nous a paru intéressant à considérer, compte tenu de la portée internationale de ces supports.

Une fois la grille d'analyse cartographique établie, il a été essentiel d'opérer une stratégie d'échantillonnage adéquate pour assurer l'exhaustivité de notre étude.

5.2.4. Sélection d'un échantillon cartographique

La diversité cartographique observée à la suite du Séisme de Haïti (2010) s'est accompagnée de nombreuses questions quant à la capacité des utilisateurs à accumuler une expérience cartographique cohérente et homogène. En outre, les différences observables à des échelles spatio-temporelles similaires nous ont poussé à considérer une variabilité des modes de représentation dans le temps, *c.-à-d.* depuis leur première diffusion. Dans ce cas de figure, il a été essentiel d'intégrer une première approche générale afin d'analyser un ensemble de cartes et leur évolution temporelle. Il a été convenu également de s'attarder sur des événements ayant été à l'origine de suffisamment de cartes pour permettre la comparaison entre producteurs. Pour répondre à ces besoins, nous avons mis en place une stratégie d'échantillonnage, empruntée de l'écologie, servant à définir une population statistique. Dans notre cas, nous avons suivi une stratégie « d'échantillonnage aléatoire guidé » (***Gros-Désormeaux, 2012***). Une population statistique a été établie sur la base d'une recherche guidée par des critères inclusifs, dont les entités ont été collectées de manière aléatoire une fois l'ensemble des filtres appliqués.

Ainsi, la carte doit être une cartographie rapide *post*-catastrophes, réalisée à partir des données d'observation satellitaire. Elle doit afficher des informations thématiques sur les dommages. Dans un premier temps, ces critères initient un filtre qui guide notre collecte. Puis le processus de recherche a été affiné en fonction du type de catastrophe et des échelles de représentation. Ce processus en entonnoir a permis d'affiner progressivement notre échantillon. L'objectif de cette stratégie est d'assurer un échantillonnage généralisable à la définition d'une famille de carte, donc d'une population statistique.

Le recueil des cartes a été réalisé en ligne auprès de différentes plateformes de diffusion disponibles : les librairies web des services satellitaires régionaux (Copernicus EMS, SERTIT, etc.), la CHARTE, mais aussi les portails d'informations sur les crises humanitaires comme RELIEFWEB[28]. La recherche s'est basée sur des mots clefs, répertoriés et traduits dans les langues les plus utilisées (anglais, espagnol, français). L'intérêt principal de ces plateformes est de pouvoir télécharger librement les cartes aux formats PDF, JPEG, ou PNG.

In fine notre premier objectif a consisté à répondre aux questions suivantes : qu'est-ce que la carte des dommages *post*-catastrophes du point de vue sémiologique et cartographique ? Existe-t-il un style cartographique dédié et reconnaissable ? ou bien sommes-nous face à une pléthore de représentations cartographiques, comme le laisse présager le caractère expansif et international de ces outils de gestion de crise ?

[28] *https://RELIEFWEB.int/*

5.3. Caractérisation des cartes des dommages *post*-catastrophes

5.3.1. *Principaux résultats de l'échantillonnage cartographique*

Présentation de l'échantillon cartographique

L'échantillon a permis de récolter 204 cartes soumises à l'analyse multicritère. Malgré la prédominance de certains aléas comme les inondations (350 activations de la CHARTE[29] entre 2000 et 2020), l'échantillonnage s'est focalisé sur trois grands types d'événements. Seuls les cyclones, les séismes et dans une moindre mesure les tsunamis, phénomènes induits du deuxième type d'aléa, ont fourni un nombre suffisamment important de cartes des dommages *post*-catastrophes. À la suite d'une inondation, les données illustraient principalement l'étendue du phénomène et dans de plus rares cas, la représentation des dommages. Ce constat fait écho au manque d'acquisitions 3D ou aux conditions atmosphériques qui caractérisaient la sous-évaluation des dommages observés lors de la confrontation des relevés de terrain et satellitaires à la suite du cyclone Irma sur Saint-Martin (cf. supra 3.3.1).

Ainsi, le matériel cartographique est composé à 64 % de cartes réalisées à la suite d'un cyclone, 30% après un séisme et 6 % sur les conséquences d'un tsunami. Les cartes les plus anciennes sont datées de 2003 et les plus récentes de 2020. L'échantillon est étalé de 2008 à 2020 pour les cyclones, de 2003 à 2018 pour les séismes et de 2007 à 2018 pour les tsunamis. Malgré 17 années d'écart qui séparaient les cartes les plus anciennes des plus récentes, la majorité de l'échantillon (70%) a été réalisée entre 2015 et 2020. Environ 23 % ont été produites entre 2010 et 2015, 5 % entre 2005 et 2010 et moins de 2 % avant 2005 (Figure 34). Ce constat n'est pas surprenant puisque c'est à partir de 2010, à la suite du séisme de Haïti, que ce type de production s'est largement développé.

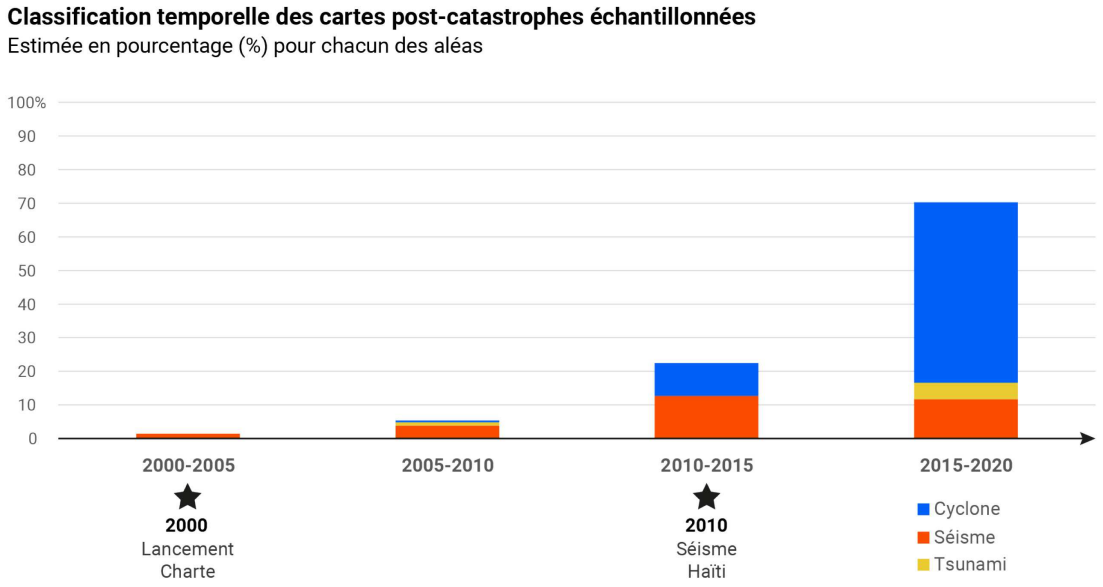


Figure 34 : Classification temporelle des cartes post-catastrophes échantillonnées

[29] *https://cgt.disasterscharter.org/en*

Le processus d'échantillonnage a permis de couvrir plusieurs régions du globe (Figure 35). Toutefois, une part importante des cartes (52 %) se concentre au niveau des Caraïbes. Les cartes échantillonnées à la suite d'événements cycloniques ou sismiques (intégrant les tsunamis) ont été les plus nombreuses. Elles ont été produites entre 2010 et 2018.

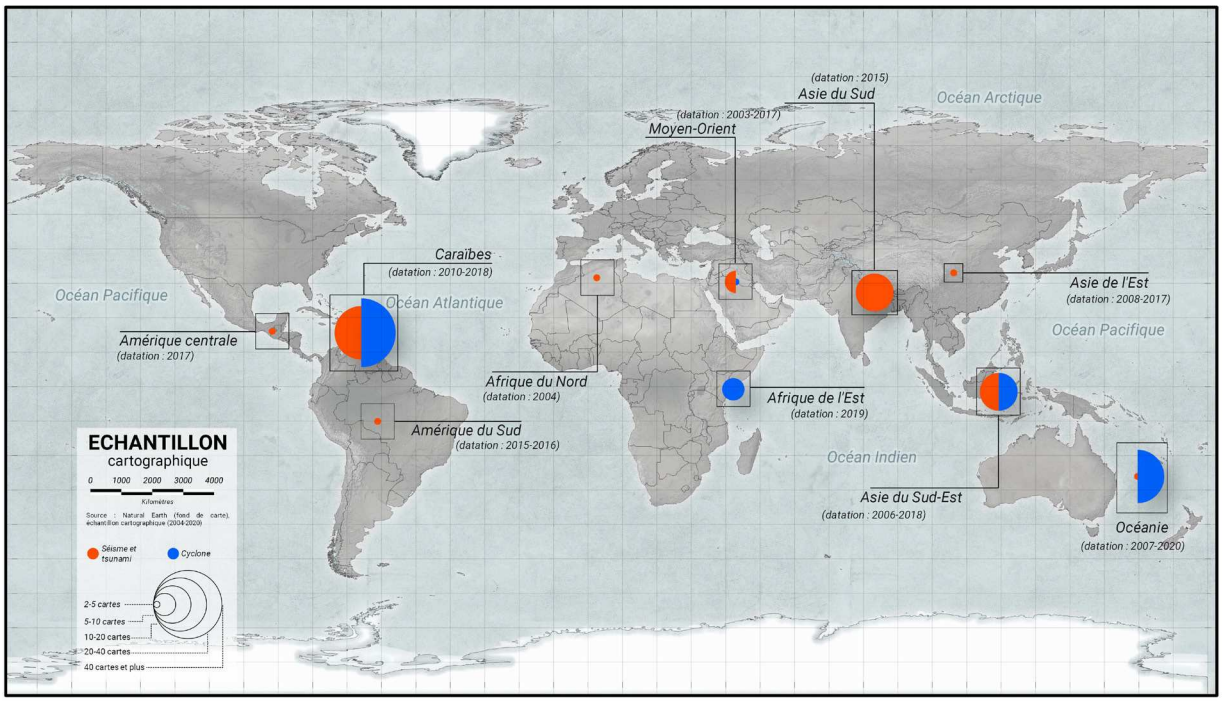


Figure 35 : Répartition géographique des échantillons cartographiques analysés et datation

Les catastrophes majeures survenues en Asie du Sud-Est, entre 2006 et 2018, ont également permis de collecter une trentaine de cartes. Elles représentaient les deux grands types d'événements dans des proportions équivalentes avec 14 cartes *post*-cyclones et 15 cartes *post*-séisme/tsunami. 25 cartes ont été échantillonnées au niveau des territoires qui composent l'Océanie (entre 2007 et 2020), dont 21 ont été produites après le passage d'un cyclone. De la même manière, davantage de cartes *post*-séismes ont pu être échantillonnées au Moyen-Orient avec un rapport de 8 contre 2 pour les cyclones. L'échantillonnage a également montré que certains secteurs, comme l'Asie du Sud, ont permis de récupérer des cartes produites à la suite d'un seul et même événement. Dans ce cas précis, 2015 correspond à la date du séisme qui a frappé le Népal.

Toutes ces cartes ont été réalisées par différents producteurs de données. Néanmoins, nous avons observé la forte présence de certains services de cartographie rapide comme l'UNOSAT (34%), la GAF-AG (12%) ou encore le SERTIT (12%). Sur l'ensemble de l'échantillon, nous avons obtenu une mosaïque composée de plus de 24 organismes, producteurs d'informations géographiques (Figure 36, 1). Ces derniers ont opéré en majeure partie à la suite de l'activation de la CHARTE internationale (58%), du service Copernicus EMS (27%) ou d'autres types d'initiatives régionales ou humanitaires (Figure 36, 2).

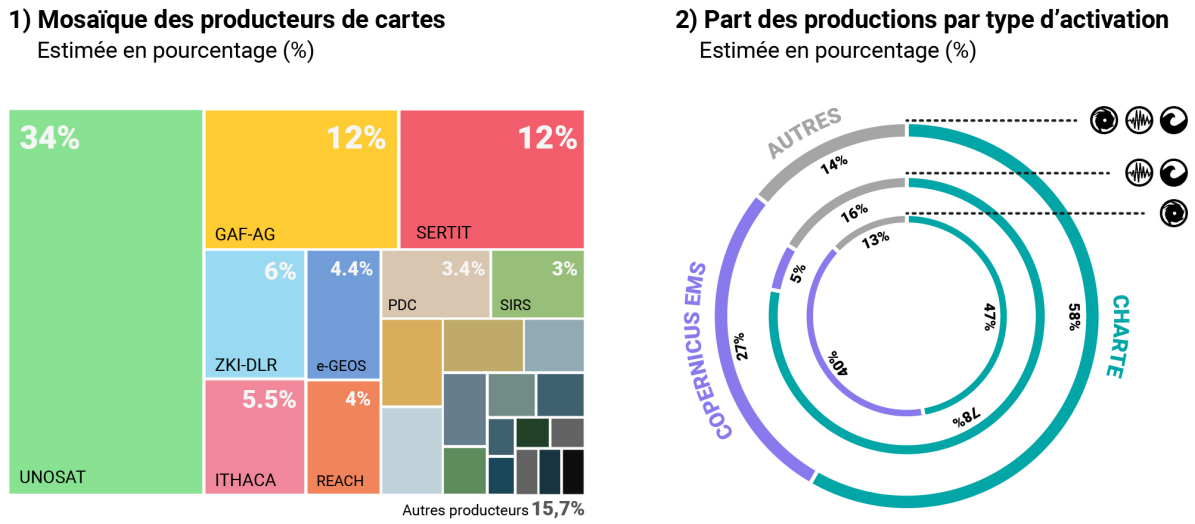


Figure 36 : Mosaïque des producteurs de cartes de dommages (1) et part des productions par type d'activation (2)

En résumé, cet échantillon est caractérisé par des cartes produites majoritairement après 2010. Ce premier constat a fixé les bornes temporelles de l'analyse évolutive des modes de conception cartographique. L'échantillonnage a également mis en avant certaines aires géographiques. Ces dernières ont concentré une majeure partie des cartes sélectionnées marquant au passage la fréquence plus importante des catastrophes majeures causées par des événements naturels de ce type dans ces régions du globe. Malgré la diversité des producteurs, nous avons également constaté la prépondérance de certaines organisations sur la scène internationale. La majeure partie ont opéré lors de l'activation de la CHARTE et du service européen Copernicus EMS.

Spécifications de l'échantillon cartographique :

- **<u>Échelle de visualisation :</u>**

Parmi les cartes échantillonnées, 36% ont été réalisées à des échelles supérieures ou égales au 1 :10 000. 34% ont été réalisées des échelles comprises entre le 1 :10 000 le 1 :25 000. Ce faisant, 70% des cartes ont donc été produites à des échelles fines et intermédiaires. Les 30% des cartes restantes donnaient une vision plus globale, synoptique, des informations. 20% étaient réalisées à des échelles comprise entre le 1 :25 000 et le 1 :50 000 tandis que 10% étaient inférieures au 1 :50 000 (Figure 37). Les résultats qui suivent ont été traités en gardant cette logique de petites et de grandes échelles.

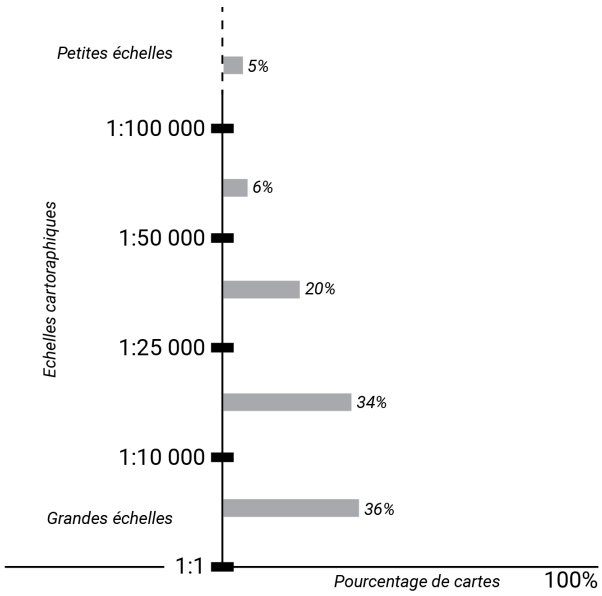


Figure 37 : Distribution des échelles cartographiques de l'échantillon de cartes analysées

- **<u>Informations thématiques :</u>**

Les informations thématiques affichées sont étroitement liées à la nature même de ce type de cartes, leurs objectifs, mais également à l'aléa de référence pour lequel elles ont été produites. Seuls 15% des cartes échantillonnées affichaient des données sur l'aléa ou les phénomènes induits, dont 12% étaient issues des productions *post*-cyclones. En ce qui concerne les dommages, 100% des cartes illustraient des niveaux de dommage sur des bâtiments qui n'étaient pas différenciés. Les dommages aux infrastructures critiques ne représentaient que 3% de l'échantillon total. Pour finir, 19% de l'échantillon communiquait une information sur les perturbations causées aux axes routiers, soit en précisant des points de coupure ou bien en donnant un état des lieux du niveau de dommages. Ces dernières étaient principalement visibles sur les cartes *post*-cyclones (16%). Inversement, les cartes *post*-séismes et/ou tsunamis échantillonnées étaient quasiment les seules à fournir la localisation des zones de regroupement ou des abris temporaires créées à la suite de l'événement. En dehors de ces informations de premier plan, apparaissaient les points d'intérêts à la gestion de crise, c'est-à-dire tout ce qui pouvait servir à la logistique ou la coordination des forces de secours. Ces informations de second plan étaient visibles pour près de 34% de l'échantillon. Les routes hors dommages, information essentielle en gestion de crise, étaient affichées dans 75% des cas à toutes les échelles.

Nous avons constaté que plus les cartes offraient une vision synoptique et plus les informations thématiques étaient orientées vers l'affichage des dommages aux bâtiments indifférenciés (Figure 38). *A contrario*, plus les échelles s'affinaient et plus les éléments représentés se diversifiaient allant jusqu'à présenter trois types d'informations : les bâtiments indifférenciés (B), les infrastructures critiques (IFC) et le réseau routier (R). Ainsi, 76% des cartes, dont les échelles étaient supérieures au 1 : 25 000, présentaient des dommages aux réseaux et aux infrastructures critiques. À titre de comparaison, 35 % des cartes, dont les échelles étaient inférieures au 1 : 25 000, donnaient ce type d'information. Dès lors, le critère d'échelle cartographique s'est avéré important pour comprendre certaines des méthodes de représentation de la part des services de cartographies rapides des dommages.

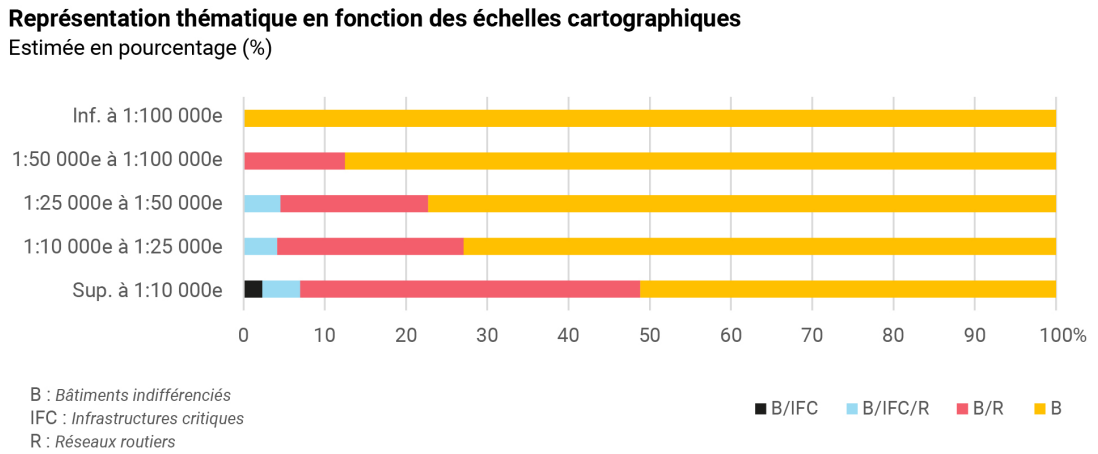


Figure 38 : Représentation thématique de la donnée en fonction des échelles cartographiques

- **<u>Type d'implantation :</u>**

Le type d'implantation s'est également révélé être dépendant de cette différence d'échelle (Figure 39). En effet, l'usage de l'implantation ponctuelle a représenté une part importante (70% en moyenne) des cartes produites à des échelles supérieures au 1 :25 000. Pour les échelles plus larges, ce type d'implantation représentait en moyenne 30% des cartes. A contrario, les implantations surfaciques étaient plus fréquentes lors du passage à des échelles inférieures au 1 :25 000. Le fait que l'implantation linéaire ai été peu mobilisée est lié aux éléments qu'elle représentait. Nous verrons plus bas qu'il s'agissait systématiquement des niveaux de dommages sur les réseaux routiers.

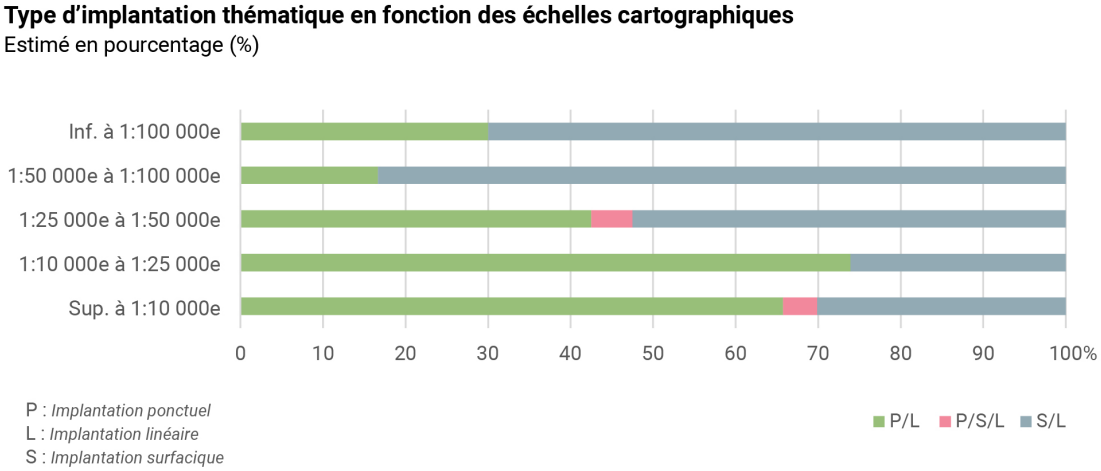


Figure 39 : Type d'implantation thématique de la donnée en fonction des échelles cartographiques

- **<u>Abstraction, densité et sélectivité de l'information thématique :</u>**

L'utilisation d'une implantation ponctuelle spécifie généralement un faible niveau d'abstraction de la donnée. Dans notre cas, les dommages sont localisés au moyen d'un point sur le bâtiment, quels que soient les niveaux d'échelles. Cela s'est concrétisé par un faible niveau de transformation de la donnée aux échelles supérieures au 1 :25 000 (Figure 40), qu'importe le type d'aléa. Inversement, plus les échelles étaient petites et plus l'abstraction de l'information était importante (effet de généralisation).

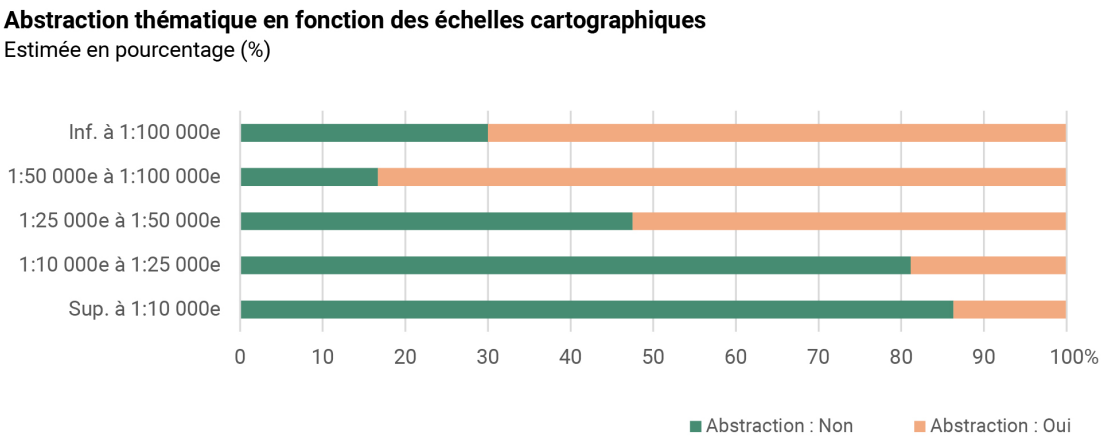


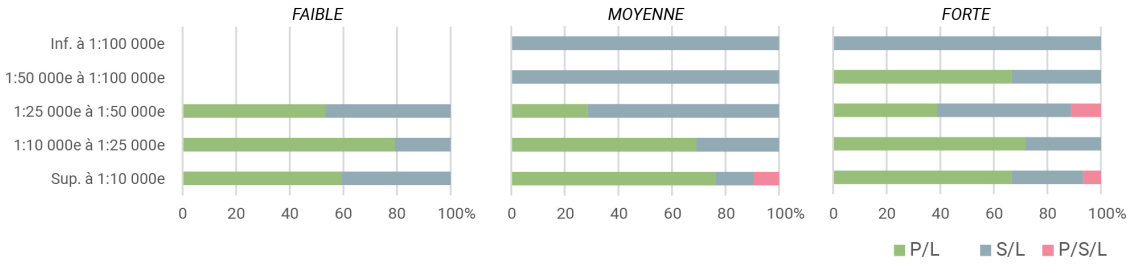
Figure 40 : Abstraction thématique de la donnée en fonction des échelles cartographiques

Ce paramètre, couplé à l'échelle d'appréciation, caractérise le niveau de densité et finalement, de sélectivité des informations thématiques. La Figure 41 présente ces tendances. Les niveaux de densité étaient plus faibles pour les cartes dont les échelles étaient supérieures au 1 :50 000 (Figure 41, 1). À ces échelles, nous avons remarqué que le type d'implantation n'accroissait pas forcément la densité d'information de l'image cartographique. Cependant, nous avons constaté que l'usage d'une implantation ponctuelle accentuait cette dernière aux plus petites échelles (< au 1 :50 000).

Plus la carte était réalisée à une petite échelle et plus la quantité d'informations pouvant être affichée était importante. Cette densité a joué donc un rôle prépondérant dans la capacité de la carte à rendre lisibles les informations de premier plan, c'est-à-dire les dommages. Par ailleurs, la sélectivité des informations était plus importante lorsque les concepteurs faisaient usage des implantations surfaciques afin d'abstraire les dommages aux petites échelles (Figure 41, 2). Ainsi et conformément aux résultats précédents (Figure 41, 1), les niveaux de sélectivité les plus faibles ont été observés aux échelles supérieures au 1 :50 000.

Bien que ces premières interprétations restent générales, elles ont permis de faire ressortir une dépendance entre les données affichées et les échelles cartographiques. Ces échelles caractérisaient le type d'information, d'implantation et donc le niveau d'abstraction de la donnée et sa sélectivité. Au-delà du type d'implantation, nous nous sommes également intéressés au détail des techniques cartographiques mobilisées. Car comme nous avons pu le voir, un gain de visibilité des informations a été recensé dans notre échantillon lorsque la donnée était simplifiée.

1) Densité des informations thématiques en fonction des échelles cartographiques et de l'implantation
Estimée en pourcentage (%)



2) Sélectivité des informations thématiques en fonction des échelles cartographiques et de l'implantation
Estimée en pourcentage (%)

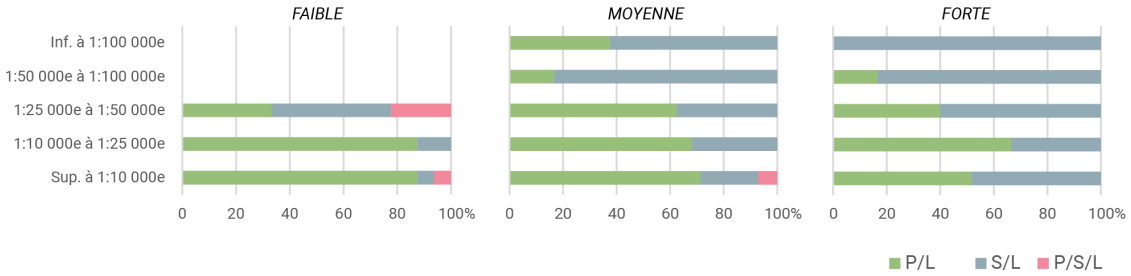


Figure 41 : Densité (1) et sélectivité (2) des informations thématiques de la donnée en fonction des échelles cartographiques et du type d'implantation

5.3.2. *Résultats détaillés pour l'affichage des dommages*

Cette section a pour objet d'illustrer les différentes techniques employées pour cartographier les dommages et d'approfondir les observations précédentes concernant le niveau de généralisation des dommages aux petites échelles. Elle détaille également le type d'informations, le type d'implantation et les variations de couleurs utilisées pour visualiser les dommages.

Caractérisation des techniques d'agrégation employées en fonction du type d'activation :

La Figure 42 (1) présente de manière générale le type d'implantation servant à représenter les dommages sur les cartes analysées en fonction du type d'activation pour laquelle les cartes ont été produites. Dans le cas des productions réalisées après activation de la CHARTE, l'emploi d'une implantation ponctuelle a été aussi courante que l'usage d'une implantation surfacique. Elles ont été complétées par l'utilisation de figurés linéaires lorsque le réseau routier était intégré à l'analyse des dommages. 75% cartes réalisées dans le cadre du service Copernicus EMS ont utilisé les implantations ponctuelles alors que 16% d'entre elles appliquaient une implantation surfacique. Il s'agissait également des seules cartes de notre échantillon à avoir eu recours aux trois types d'implantations (ponctuel/surfacique/linéaire) afin de présenter à la fois les dommages aux infrastructures et l'état du réseau routier. Dans les « autres » cas, 66 % des cartes ont appliqué l'implantation ponctuelle et 34% une implantation surfacique.

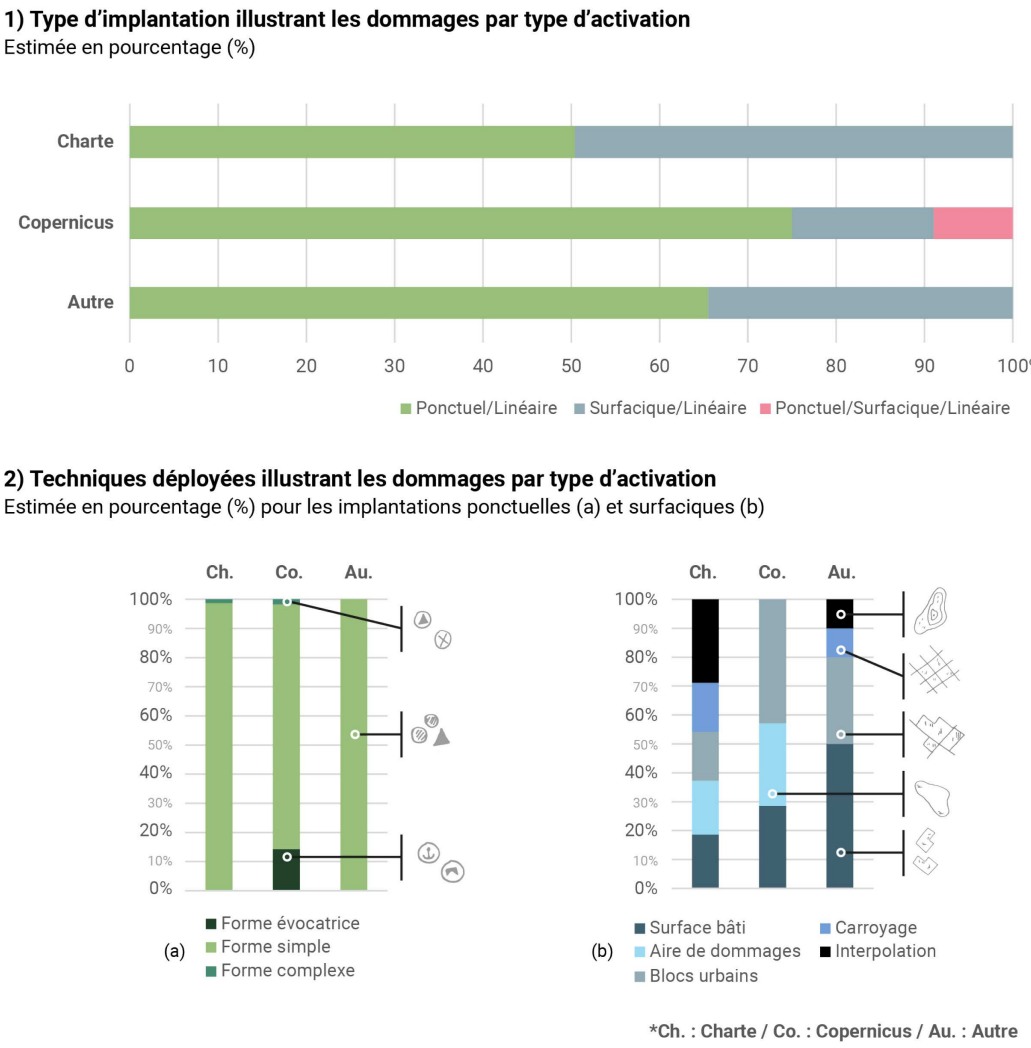


Figure 42 : Type d'implantation et de techniques employées par type d'activation

La Figure 42 (2) détaille les techniques cartographiques déployées pour illustrer les dommages en fonction du type d'activation. L'utilisation de formes simples était prépondérante en implantation ponctuelle (a). Cette technique consistait à implanter une forme géométrique au centre du bâtiment diagnostiqué (Tableau 11). Seules les cartes réalisées à la suite d'une activation Copernicus EMS utilisaient des formes évocatrices. Ces dernières sont réalisées à partir de pictogrammes reflétant par exemple un concept, lieu, objet, animal. Les stations essences sont alors représentées par une pompe à essences, les aéroports par des avions, etc. Ces dernières ont l'avantage d'être simples et fortement suggestives. Elles ont servi principalement à représenter les dommages aux infrastructures critiques (aéroport, centrale électrique, ponts, tunnels, etc.). L'endommagement des réseaux pouvait être aussi représenté par des formes complexes (conventionnelles). Elles restent toutefois peu présentes dans notre échantillon.

Tableau 11 : Techniques d'agrégation des dommages utilisées par les SEM

Implantation	Technique cartographique	Information
Ponctuelle	Point au bâti	Représentation par l'implantation d'une forme géométrique (simple ou complexe) ou évocatrice (picturale) sur la surface d'une structure, d'un segment de route, etc. endommagé
Surfacique	Surface au bâti	Représentation correspondant à la surface du bâtiment endommagé
	Aire de dommages	Représentation correspondant à la surface de plusieurs bâtiments endommagés
	Blocs urbains	Représentation à la surface d'un maillage irrégulier créé par la segmentation de la zone urbaine à partir de tronçon routier
	Carroyage	Représentation correspondant à la surface d'un maillage régulier créé à partir de la segmentation du territoire par des formes géométriques homogènes (carré par exemple)
	Interpolation	Représentation correspondant à la surface d'un maillage régulier créé à partir de l'étendue d'une couche de points
Linéaire	Ligne	Représentation des segments de routes endommagés par la catastrophe.

La représentation en implantation surfacique est plus diversifiée. Les techniques de surface au bâti, d'aires de dommages, de blocs urbains, de carroyage et d'interpolation ont représenté en moyenne 20% des cartes produites lors d'une activation de la CHARTE. Les cartes produites dans le cadre du service Copernicus EMS ont agrégé les dommages à la surface du bâti (28), par aires de dommages (29) et surtout par blocs urbains (43%). Ce constat a témoigné d'une plus grande standardisation des conceptions cartographiques à l'échelle des services régionaux en opposition à la diversité constatée lors d'une activation de la CHARTE. Pour les « autres », les techniques de surface au bâti (50%) et de blocs urbains (30%) sont ressorties majoritairement. Ainsi, les cartes produites dans le cadre de conventions internationales ont affiché des niveaux de standardisation plus ou moins marqués. Cependant, l'usage du point, sous sa forme la plus simple, est grandement appréciée dans la production des cartes aux grandes échelles. Cette marque de fabrique se retrouve notamment dans la figure suivante (Figure 43) qui synthétise les techniques employées sur l'ensemble des cartes échantillonnées.

- **<u>Échelle d'appréciation et techniques employées :</u>**

La Figure 43 permet de visualiser les différentes implantations et techniques déployées en fonction du critère d'échelle cartographique. Les résultats ont été calculés sur la base des itérations renseignées dans la grille d'analyse cartographique et regroupés en fonction des tâches à accomplir. Dans le cas présent, il s'agissait principalement de l'identification des dommages aux bâtiments (bâti indifférencié et infrastructure critique). Cette figure offre deux constats. Pour le premier, une grande partie des cartes échantillonnées, soit près de 70%, a été produite à des échelles supérieures au 1 :25 000. Elles sont représentées par des flux de couleurs froides dont les dimensions sont propositionnelles aux pourcentages d'observation des critères retenus pour cette figure. Cela a impliqué qu'au-delà de la technique d'échantillonnage, il a été plus fréquent de trouver des cartes produites à grande échelle.

Second constat, les cartes échantillonnées à des échelles inférieures au 1 :25 000, représentées par des flux de couleurs chaudes ici, ont utilisé des techniques cartographiques plus disparates.

Pour les cartes à grande échelle, l'implantation ponctuelle a très largement été représentée (environ 70%). L'implantation surfacique (environ 30%) s'est caractérisée principalement par des méthodes d'agrégation à la surface du bâti (13%). Les techniques d'interpolation et de blocs urbains ont été utilisées dans de plus rares cas (6 et 5% respectivement). Aux petites échelles, les producteurs ont mobilisé plus souvent les méthodes d'agrégation en implantation surfacique (64.5% des cartes <1 :25 000). À ces échelles, les blocs urbains, les interpolations, les aires de dommages et les carroyages représentaient 11 à 18% des cartes. Les 35.5% restant ont présenté les dommages sous la forme de point au bâti. Ce second constat vient confirmer les observations précédentes (Figure 40) concernant le niveau d'abstractions progressif des dommages lors de la descente d'échelle. Ainsi, l'utilisateur se confronte potentiellement à une diversité accrue des techniques échantillonnées aux petites échelles. Contrairement aux échelles plus fines, où il sera plus enclin à reconnaitre certains modes de représentations. Toutefois, l'utilisateur se confronte à une autre problématique qui concerne le type d'information qui est illustré par ces différentes méthodes d'agrégation.

Visualiser les dommages dans la cartographie post-catastrophe

Echantillon : 204 cartes

Pourcentage (%) :
d'itérations analysées dans la grille d'analyse cartographique :

36% *(maximum)*
20%
10%
5%
1%

Tâches à accomplir :

Identifier les dommages : accessibilité

Estimer les dommages au réseau et les moyens d'accessibilité

Identifier les dommages : Bâtiments

Identifier l'étendue des zones touchées (hot spots)
Estimer les dommages au bâti
Estimer les dommages aux infrastructures critiques & sensibles

Localiser les populations déplacées :

Estimer les zones de regroupement
Visualiser les sites refuges

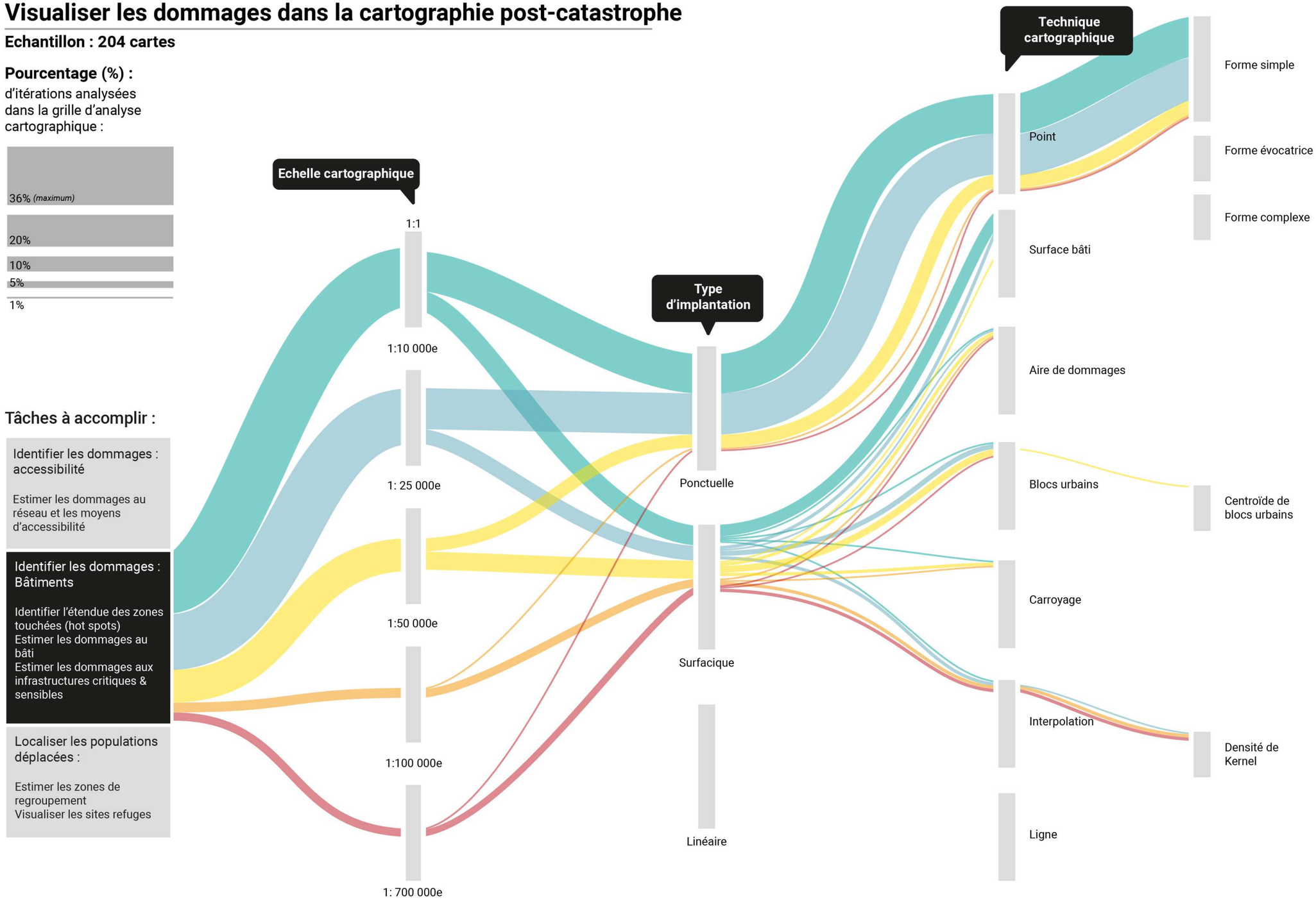


Figure 43 : Pourcentage d'itérations observées en fonction des paramètres d'échelle d'appréciation, des types d'implantations et des techniques employées pour la représentation des dommages aux bâtiments

- **<u>Techniques employées et types d'informations affichées :</u>**

Nous présentons ici le type d'informations quantitatives ou qualitatives fournies par les différentes techniques analysées (Figure 44). Pour cela, nous avons pris soin d'illustrer le nombre de classes que proposaient par chacune des typologies de dommages observables en légende. La Figure 44 (a) montre que les techniques d'implantation ponctuelle sous une forme simple ont communiqué une information qualitative principalement ordonnée (67%) en 3 ou 4 classes (28%) et dans une moindre mesure, en 2 classes (10%). Une part plus minoritaire (33%) a permis d'identifier les bâtiments endommagés sans dresser les différents seuils d'endommagement.

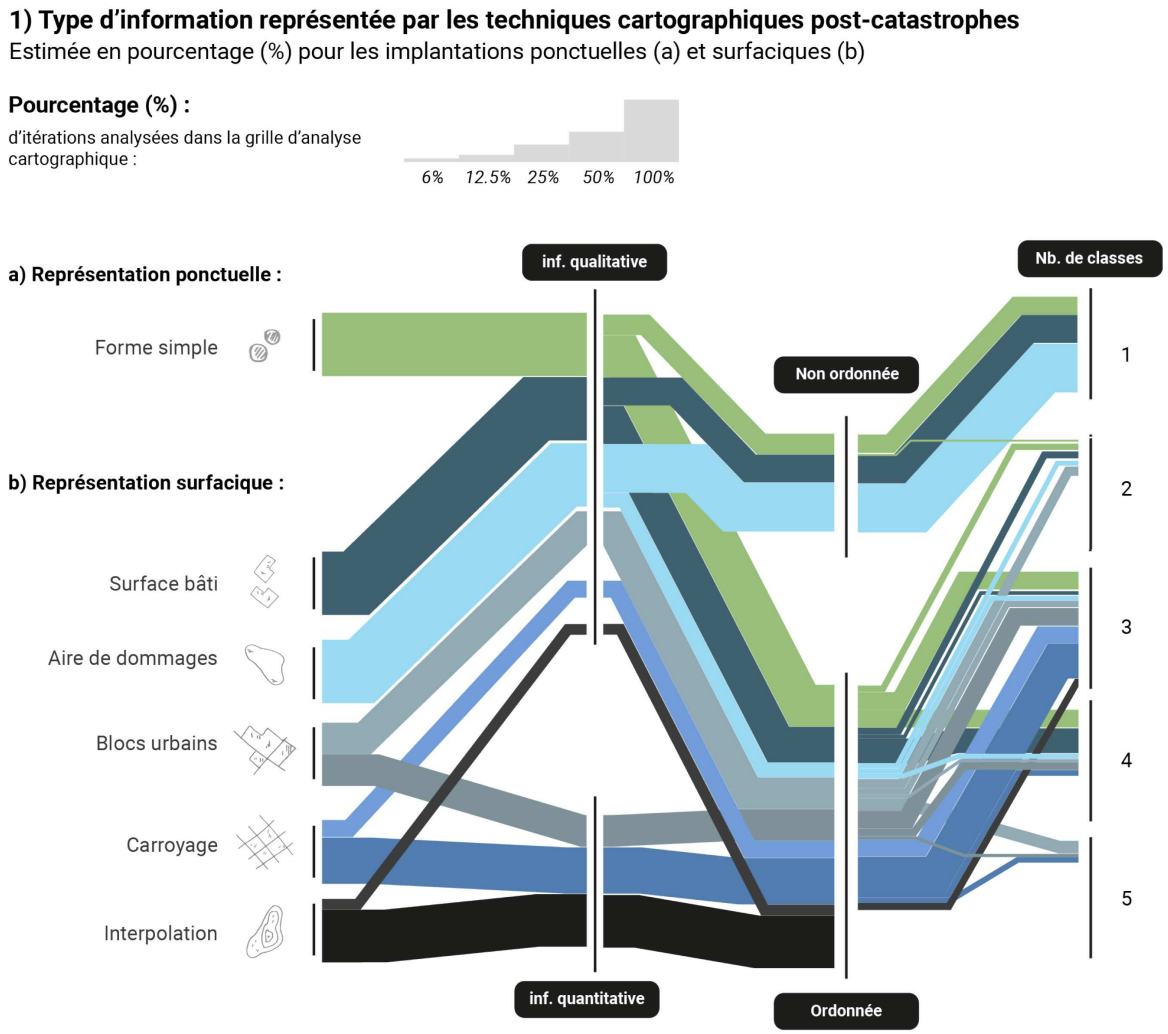


Figure 44 : Type d'information représentée par les techniques cartographiques post-catastrophes.

Pour les implantations surfaciques (Figure 44, b), la précision des dommages aux surfaces des bâtiments a été plus mitigée. 44% ont illustré simplement les bâtiments endommagés. 56% ont permis de détailler le niveau d'endommagement selon 4 classes (39%), 2 classes (11%) ou encore 3 et 5 classes (6%). Les aires de dommages ont été principalement axées vers une visualisation des zones impactées sans distinction typologique (77%). 23% ont détaillé à égalité les dommages selon 2 à 4 classes. 50% des blocs urbains ont été utilisés afin de fournir une information qualitative ordonnée selon 5 (20%) à 2 (15%) classes principalement. L'autre moitié a fourni une information quantitative, notamment à travers 3 (30%), 4 (15%) voire 5 (5%) classes. Les carroyages ont été utilisés principalement afin de communiquer

une information quantitative (73%). 27% ont fourni une information qualitative. Dans les deux cas, ils ont permis de distinguer la quantité ou la qualité des niveaux de dommages selon 3 classes (55% et 27% respectivement). Pour finir, l'interpolation a été privilégiée pour illustrer des quantités (83%), notamment par l'intermédiaire des techniques de densité. Dans ce cas précis, il a été difficile d'estimer le nombre de classes, car elles n'étaient pas spécifiées en légende. Quand l'information était qualitative, elle a été ordonnée présentant les niveaux de dommages selon 3 classes (11%).

Parmi les techniques analysées, seuls les blocs urbains, les carroyages et les interpolations ont affiché une information quantitative ou qualitative. Dans le cas où ces techniques présentaient une information quantitative, elles ont été complétées par des points au bâti permettant de localiser les données analysées. Cela a notamment été le cas pour 53% des interpolations, 33% des blocs urbains et 25% des carroyages. Lorsqu'elles étaient qualitatives, l'ensemble des interpolations et 22% des blocs urbains ont été complétés par cette même méthode pour localiser les bâtiments endommagés. Nous avons également constaté que seuls les points, les surfaces au bâti et les aires de dommages ont été utilisés pour afficher les infrastructures endommagées sans faire de distinction typologique. Ces techniques n'ont pas été pas directement employées pour illustrer les quantités de bâtiments touchés par l'événement. Cependant, les points et les surfaces au bâti sont des techniques qui permettent d'estimer un nombre ou une densité grâce à leur agrégation spatiale. En dehors des points ou des surfaces au bâti individuel, seulement 5% des techniques d'agrégation (blocs urbains, carroyage et interpolation) ont permis d'estimer à la fois la quantité et la qualité des dommages. En lien avec le type d'information et le nombre de classes employées pour réaliser la typologie des dommages, les concepteurs de cartes ont fait le choix de code couleur spécifique.

- **Données thématiques et variables de couleur :**

En fonction des techniques employées, les variables de couleur ont été utilisées pour localiser les bâtiments affectés, connaitre les niveaux d'endommagement (information qualitative ordonnée) et dans d'autres cas, estimer la quantité de bâtiments touchés par l'événement (information quantitative). Ces informations et les gammes de couleurs utilisées ont été répertoriées dans la Figure 45. Nous avons vu précédemment (cf. supra 0) que le thème d'une carte pouvait coïncider avec sa symbologie, notamment avec les couleurs qui sont adoptées par le concepteur (Figure 32). Les résultats présentés en Figure 45 témoignent d'une utilisation intentionnelle du grain ou d'une trame pleine de couleur chaude pour illustrer les dommages. Dans le cas des implantations ponctuelles, les bâtiments endommagés ont été représentés en rouge (Figure 45, a). Lorsque les dommages étaient ordonnés en plusieurs classes, plusieurs dégradés de couleurs, allant du rouge à l'orange puis passant au jaune, voire au vert et au gris dans certains cas ont pu être extraits. Le constat a été identique pour les implantations surfaciques (Figure 45, b). La majeure partie des techniques analysées a usé des gammes similaires, qu'il s'agisse d'informations qualitatives ordonnées ou quantitatives. Les méthodes d'interpolation, à la différence des autres, ont affiché des couleurs pourpres, violettes allant aux gammes de bleu pour les niveaux ou les quantités de dommages les plus élevés. Les couleurs froides ont aussi été utilisées pour les gradients de dommages les plus bas. Ainsi, certaines divergences colorimétriques ont été analysées malgré l'apparente saillance des couleurs chaudes. De plus, il a été mis en exergue une proximité visuelle entre les informations quantitatives et qualitatives, notamment pour les techniques des blocs urbains ou d'interpolation.

Variable de couleur utilisée dans la typologie des dommages par techniques cartographiques
Estimée en pourcentage (%) pour les implantations ponctuelles (a) et surfaciques (b)

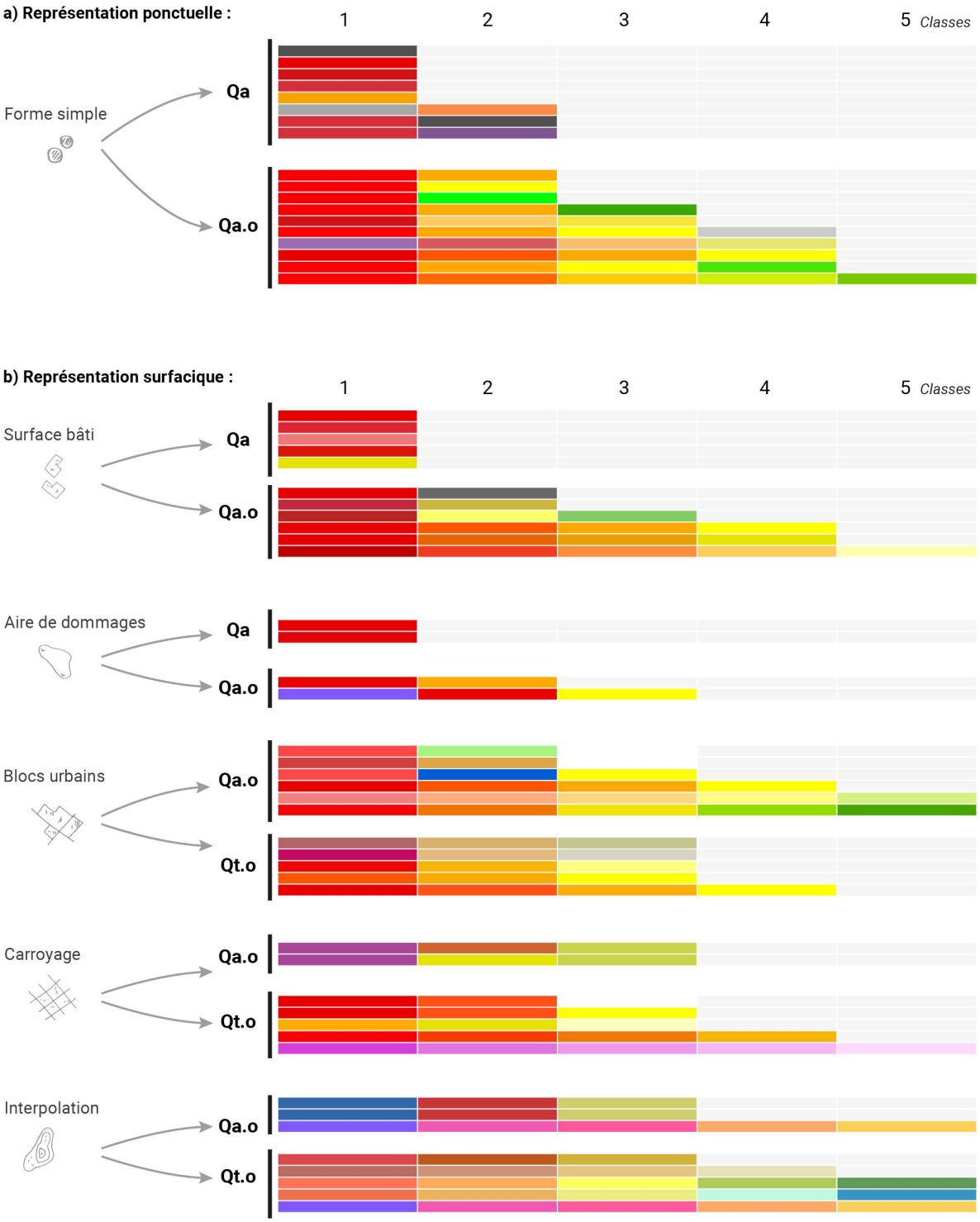


Figure 45 : Colorimétrie utilisée dans la typologie des dommages par techniques cartographiques, détaillés pour les représentations ponctuelles (a) et surfaciques (b) selon le type d'informations, qualitatif (Qa) et quantitatif (Qt) ordonnée (o) ou non

Si ces couleurs sont finalement caractéristiques du thème abordé, il subsiste néanmoins certains problèmes. L'utilisateur visualise plusieurs cartes dont les variables visuelles changent très peu vis-à-vis du type d'information qu'elles transmettent. En outre, l'utilisation de la couleur est prédominante dans ces cartes, car elle est la seule variable différenciatrice, d'ordre et de quantité. Une variable efficace doit assurer une bonne sélectivité de l'information. En cela, ces résultats rejoignent les critiques émises sur le type d'implantation et les échelles d'appréciation (Figure 40 et Figure 41). Cette sélectivité pourra être augmentée ou diminuée en fonction des informations de second plan et des fonds de cartes utilisées.

5.3.3. *Résultats détaillés pour les données de second plan et les fonds de carte*

Caractérisation des informations de second plan :

Jusqu'à présent, seule la représentation cartographique des dommages a été abordée, mais qu'en est-il des informations retranscrites au second plan ? La première concerne les axes routiers. Ils ont été recensés dans 77% des cartes échantillonnées (Figure 46) et à toutes les échelles (en moyenne).

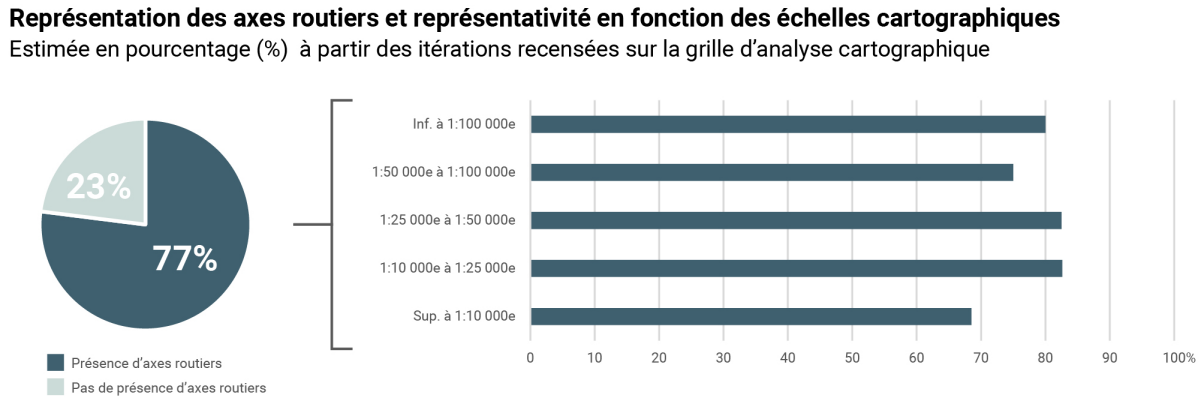


Figure 46 : Axes routiers et représentativité en fonction des échelles cartographiques dans les cartes de dommages post-catastrophes

En moyenne, 77% des cartes ont donné une information sur les axes principaux, 62% sur les axes secondaires et 51% sur les axes tertiaires (Figure 47). Il a d'ailleurs été plus fréquent de trouver l'ensemble de cette typologie aux grandes échelles. Aux petites échelles, leur représentation s'est limitée aux axes principaux et secondaires. L'analyse des gammes de couleurs a fait ressortir la prépondérance de certaines gammes utilisées pour visualiser chacun des types d'axes.

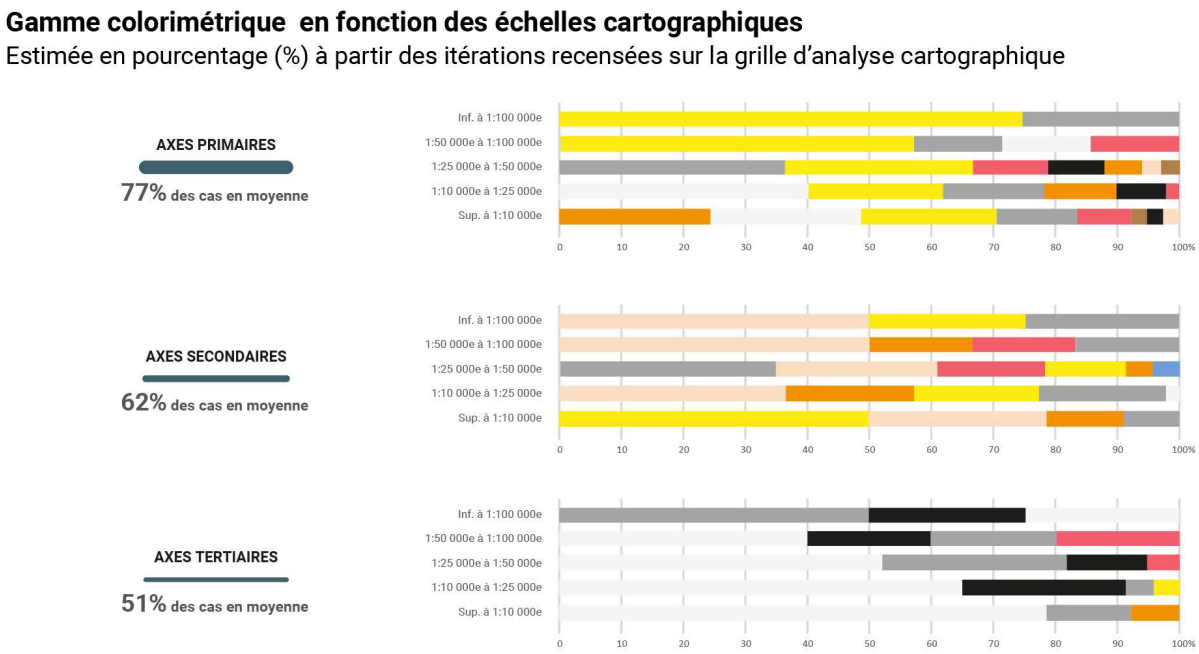


Figure 47 : Gamme colorimétrique des axes routiers en fonction des échelles cartographiques

Les réseaux primaires et secondaires sont illustrés par un éventail de couleurs principalement chaudes. Les tons neutres (gammes de gris, de blanc et de noir) ont été employés en grande partie pour les axes tertiaires. Nous avons également constaté que plus l'échelle était petite et plus la panoplie des couleurs tendait à se réduire. Pour les axes principaux par exemple, elle passait de 8 pour les échelles supérieures au 1 :10 000 à 4 pour les échelles inférieures au 1 :50 000. L'intérêt porté à la couleur de ces éléments n'a pas été anodin. Comme nous avons pu le voir, elle pouvait se confondre avec celles employées pour afficher les informations sur le dommage. En effet, 87% des cartes qui affichaient les dommages du réseau routier se sont également accompagnées d'une représentation des axes encore intacts utilisant dans 51% des cas des couleurs chaudes. Ce double usage des couleurs peut alors brouiller l'interprétation des utilisateurs lorsqu'ils doivent faire la distinction entre les réseaux endommagés et intacts.

Parmi les autres informations recensées, les bâtiments et les ponts ont été peu représentés dans notre échantillon (3 et 4% respectivement). 39% des cartes ont renseigné le réseau hydrographique, principalement aux échelles supérieures au 1 :25 000. Ce dernier était cartographié en implantations linéaires (55% en moyenne) et surfaciques (32% en moyenne). Par ailleurs, les points d'intérêts pour la gestion de crise ont été renseignés dans 34% des cartes échantillonnées. Ils regroupaient les informations utiles comme la localisation des établissements recevant du public (ERP), des infrastructures critiques et essentielles pour la gestion de crise. Ces éléments graphiques ont été recensés et détaillés dans la Figure 48. Ils étaient présents principalement aux échelles supérieures au 1 :25 000 et ont été cartographiés sous la forme d'implantation ponctuelle dans 77% des cas en moyenne. 85% de ces implantations utilisaient des formes évocatrices, 12% des formes simples et 3% des formes complexes. Dans le cas où les points présentaient des niveaux de dommages, ils ont été affichés en utilisant les mêmes codes couleur que les seuils d'endommagement généraux des cartes. Dans la mesure où ils ne présentaient pas cette information, les couleurs employées étaient majoritairement des gammes neutres (gammes de gris et de noirs). Dans le cas des cartes produites au sein de Copernicus EMS, nous avons noté une utilisation privilégiée des formes évocatrices identiques.

Au sein de la CHARTE, 70% des concepteurs ont eu recours à des formes évocatrices alors que 21% ont utilisé des figurés simples et 5% des formes complexes non standardisées entre les producteurs.

Points d'intérêts à la gestion de crise	Forme simple	Forme évocatrice	Forme complexe
Installations sensibles *(a) site industriel* *(b) station électrique*	*(a)* *(b)*	*(a)* *(b)*	*(a)*
Services d'urgence *(a) pompier* *(b) force de l'ordre* *(c) Sécurité Civile*	*(a)* *(b)* *(c)*	*(a)* *(b)* *(c)*	*(a)* *(b)* *(c)*
Evacuation *(a) campement temporaire* *(b) site refuge*	*(a)* *(b)*	*(a)* *(b)*	*(a)* *(b)*
Ressources *(a) institution* *(b) hospitalier* *(c) télécommunication* *(d) station essence*	*(a)* *(b)* *(c)* *(d)*	*(a)* *(b)* *(c)* *(d)*	*(a)* *(b)* *(c)* *(d)*
Transport *(a) aérien* *(b) routier (pont & tunnel)* *(c) ferroviaire* *(d) maritime/fluvial*	*(a)* *(b)* *(c)* *(d)*	*(a)* *(b)* *(c)* *(d)*	*(a)* *(b)* *(c)* *(d)*
Installations publiques *(a) centre commercial* *(b) terrain de sport* *(c) religieux* *(d) bibliothèque* *(e) établissement scolaire*	*(a)* *(b)* *(c)* *(d)* *(e)*	*(a)* *(b)* *(c)* *(d)* *(e)*	*(a)* *(b)* *(c)* *(d)* *(e)*

Figure 48 : Classification des symboles ponctuels représentant des points d'intérêts utiles à la gestion de crise dans la cartographie des dommages post-catastrophes

Caractérisation des fonds de carte :

Une distinction a été faite entre les éléments de second plan et le fond de carte servant de support à toute l'information géographique présentée. La Figure 49 met en avant la représentativité de ces différents fonds de cartes en fonction des échelles cartographiques. Les résultats ont montré que les images dérivées des satellites, principalement des images optiques, ont grandement été mobilisées dans

les cartographies *post*-catastrophes[30]. Elles ont représenté une part supérieure à 70% des fonds de cartes utilisées aux échelles supérieures à 1 :50 000e. Au-delà, nous avons constaté le recours aux fonds de type « reliefs ombragés » (MNT) et de type « OSM/Topo » (Open Street Map/Topographique). L'illustration du relief a été particulièrement présente pour les cartes inférieures au 1 :100 000 (80%). Par ailleurs, les contours administratifs servant à délimiter des frontières communales par exemple ont été peu mobilisés.

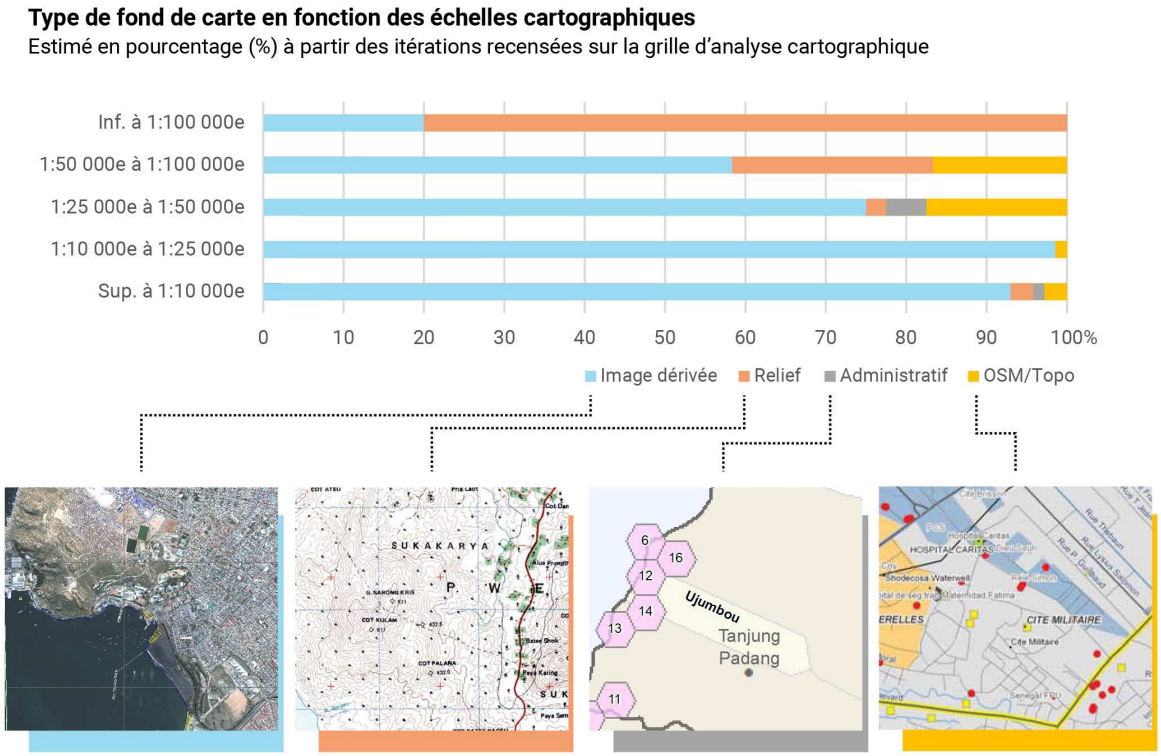


Figure 49 : Type de fond de carte en fonction des échelles cartographiques

L'usage des fonds de cartes a également été détaillé par type d'activation. L'emploi des images satellites comme fond de carte s'est montré particulièrement courant dans les productions issues de Copernicus EMS. Cependant, ces choix de conception ne sont pas différents de ceux de la CHARTE et des « autres » cas où l'usage des images dérivées a également été très marqué. Seule la catégorie « autres » s'est démarquée avec une utilisation plus importante des fonds de type OSM aux échelles comprises entre 1 :25 000 et 1 :50 000 (60%) et inférieur au 1 :100 000 (100%). Au sein de la CHARTE, 70% des cartes échantillonnées à des échelles comprises entre 1 :50 000 et 1 : 100 000 ont affiché des fonds satellitaires. Notons toutefois que l'usage des fonds de cartes reliefs a été plus important aux échelles inférieures au 1 :100 000 (80%).

[30] A noter que cette utilisation de l'image satellite dans les cartes a donné naissance aux spatiocartes qui permettent la visualisation d'une grande quantité d'information par l'intermédiaire de la combinaison de plusieurs images (***Donnay, 2000***).

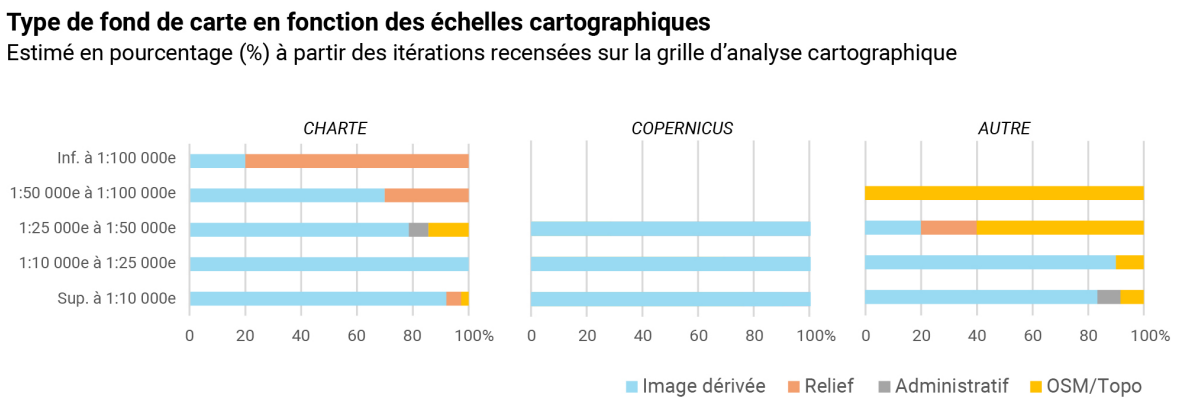


Figure 50 : Type de fond de carte en fonction des échelles cartographiques et par type d'activation

En résumé, les images dérivées des vues satellitaires ont été la principale ressource utilisée comme fond de carte pour la production *post*-catastrophes. Elles sont principalement dérivées des images optiques et dans de plus rares cas des acquisitions radars. Le relief et les fonds de type OSM ont été employés aux plus petites échelles, là où l'imagerie satellitaire n'est plus vraiment nécessaire ni efficace pour visualiser l'occupation du sol. Cette analyse a fait ressortir l'utilisation quasi systématique des images optiques obtenues lors du passage du satellite au-dessus de la zone géographique touchée. Ce choix peut s'expliquer par la volonté des concepteurs à transmettre la même image que celle ayant servi à l'évaluation des dommages aux bâtiments. Elle permet par exemple de contextualiser les contraintes liées à une couverture nuageuse persistante et qui peuvent nuire à l'efficacité de la photo-interprétation. Cependant, cela peut avoir comme effet indésirable de saturer la carte et de réduire la qualité visuelle générale de son image.

5.4. Synthèse des connaissances acquises

Cette section fait la synthèse des connaissances acquises sur les modes de représentations cartographiques au sein des productions *post*-catastrophes. L'analyse a fait ressortir l'environnement dans lequel sont conçues ces cartes. Elles interviennent dans un contexte de crise, à la suite d'un événement, et répondent à des tâches bien précises. Ces paramètres impliquent une orientation particulière des thèmes affichés et des échelles de visualisation.

Il en ressort que les principales données cartographiées sont les dommages aux infrastructures (bâtiments et infrastructures critiques). Les évaluations de dommages sur les réseaux sont plus réduites. Elles ont été observées dans 18% des cartes de l'échantillon, dont la majeure partie (67%) concernait les productions de Copernicus. L'analyse cartographique a démontré également qu'une part importante de l'échantillon (70% des cartes) a été réalisé à des échelles supérieures au 1 : 25 000. Ce constat s'explique principalement par les processus d'échantillonnage qui ont rassemblé davantage de cartes aux grandes échelles. Néanmoins, cela introduit potentiellement une plus faible disponibilité et réalisation des cartes aux petites échelles pour certains producteurs. L'analyse a montré que 87% des cartes Copernicus EMS ont été produites à des échelles supérieures au 1 : 25 000. Pour les cartes produites dans le cadre de la CHARTE, les échelles sont apparues beaucoup plus variées (42% sont inférieures au 1 :25 000). La

transcription cartographique des dommages à ces échelles a varié beaucoup plus vis-à-vis des cartes produites à des échelles plus fines (supérieure au 1 :25 000). Ces résultats ont impliqué une plus grande difficulté à trouver un consensus cartographique internationale et *in fine* à introduire un véritable **style cartographique aux petites échelles**. *A contrario*, les dommages visualisés aux grandes échelles ont principalement été cartographiés par le biais d'implantation ponctuelle (70%). En dehors des dommages, ce sont également à ces échelles que nous avons retrouvé une plus grande homogénéité des informations de second plan (point d'intérêts, axes routiers, etc.) et des fonds de cartes utilisés. Par conséquent, il a été plus aisé d'établir un style cartographique source et une reconnaissance visuelle des cartes de dommages produites à grande échelle.

Vis-à-vis des règles de sémiologie graphique, la variation des techniques et des variables visuelles employées pour illustrer les dommages peuvent engendrer des erreurs quant à l'interprétation finale des utilisateurs. La critique principale de ces cartes porte sur la surcharge visuelle engendrée par l'implantation de nombreuses composantes, du choix des couleurs, du niveau d'échelle, de généralisation et du fond de carte utilisé. À titre d'exemple, la Figure 51 fournit un extrait de la carte des dommages *post*-Irma diffusée par Copernicus à l'échelle 1 : 25 000. Les implantations linéaires des réseaux routiers se confondent aux couleurs utilisées pour représenter les niveaux de dommages sur le bâti et le relief (isolignes). La couverture nuageuse de l'image satellite utilisée en fond et son ombre portée cachent une partie des aires urbaines. Les toponymes et la zone d'aléa (houle) sont difficilement perceptibles du fait de la surcharge visuelle engendrée par ces choix sémiologiques (***Candela et al., sous presse***). Cette saturation peut avoir un effet négatif sur la lisibilité de la carte. Nous avons vu également que certaines constantes, comme la variable de couleur utilisée dans la nomenclature de dommages, pouvaient poser des problèmes. Les couleurs chaudes sont utilisées de manière indistincte pour présenter un type d'informations différent (quantitatif ou qualitatif).

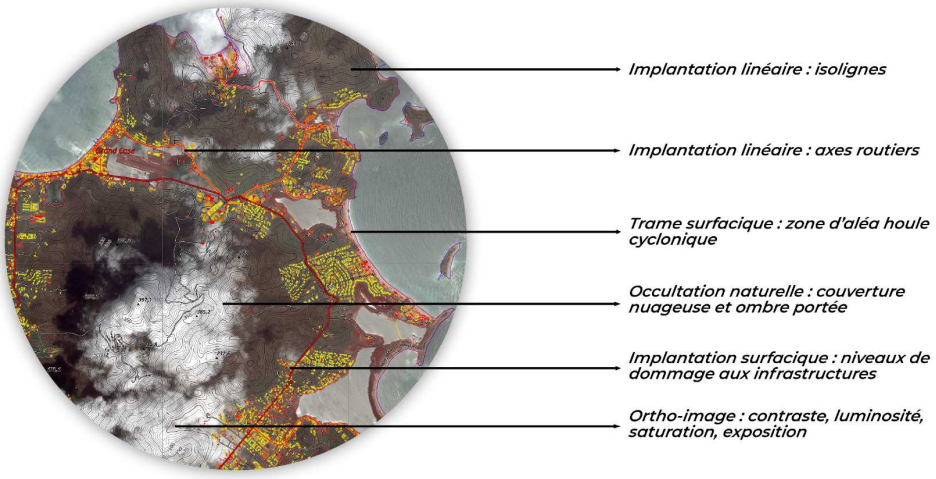


Figure 51 : Extrait de la carte d'évaluation des dommages à la suite du cyclone Irma (Copernicus, EMS, 2017)

Malgré l'existence de pratiques cartographiques et sémiologiques communes, la cartographie des dommages *post*-catastrophes se caractérise par une diversité des modes de représentation du dommage influencés par le choix des échelles de visualisation. Afin d'approfondir, l'implication de ces variables sur l'interprétation utilisateur, nous proposons une expérimentation reprenant le cas du séisme de Haïti en 2010.

Chapitre 6 : Expérimentation #1, implication de la diversité des représentations sur l'interprétation utilisateur (le cas du séisme de Haïti de 2010)

6.1. Définir les capacités perceptuelles de représentations standards préexistantes par un groupe d'utilisateurs homogène

6.1.1. Le séisme de Haïti (2010) comme marqueur d'une « catastrophe cartographique »

Le contexte géographique de Haïti

Haïti se situe dans les Grandes Antilles, entre Porto Rico et Cuba. Son territoire occupe la partie occidentale de l'île d'Hispaniola, l'autre partie étant occupée par la République Dominicaine. Le pays occupe une surface de 27 750 km^2 environ avec pour point culminant, le pic la Selle à 2 680 mètres d'altitude. Par ailleurs, son relief lui vaut le nom de « Terre haute ou montagneuse ». La population était estimée à 10, 8 millions habitants en 2018 dont la moitié (environ 52%) vit en milieu urbain.



Figure 52 : Localisation du secteur d'étude (Kaupp 2009)

Un contexte favorable à des catastrophes

Compte tenu de ses composantes territoriales, à la fois physiques et humaines, Haïti est caractérisé par un contexte d'exposition à des aléas majeurs couplée à une forte vulnérabilité urbaine. En effet, les facteurs de pauvreté de ce territoire (***Mathurin, 2013***), s'additionnent à une faible sensibilisation des populations aux risques et des constructions non adaptées. Par ailleurs, le parc immobilier haïtien est l'exemple même d'un état d'exposition exceptionnelle face aux risques naturels, notamment face aux séismes (***Klett, 2011***). L'activité sismique de l'île d'Hispaniola (regroupant Haïti et la République Dominicaine), marquée et intense du fait de sa situation entre deux plaques tectoniques, se caractérise par un réseau de failles de décrochement et de compression. Une activité historique que l'on retrouve dans les écrits dès le 17e siècle et qui a frappé à nouveau le territoire de l'Hispaniola le 12 janvier 2010 à 17h53min.

Une catastrophe majeure :

Le 12 janvier 2010, la rupture de la faille d'Enriquillo (décrochement) provoque un tremblement de terre d'une magnitude de 7 sur l'échelle de Richter (intensité max épicentrale : 10 MMI). Le séisme touche fortement Haïti. Sa capitale, Port-au-Prince ainsi que de nombreuses villes telles que Carrefour, Jacmel ou encore Petit Goave, proches de l'épicentre, subissent à la fois d'importantes destructions et des pertes humaines considérables. Au total ce sont plus de 250 000 morts et 300 000 blessés de cette catastrophe (***Grünewald, 2010; Joffroy et al., 2014***). 1,5 million d'Haïtiens se retrouvent sans abris (***Joffroy et al., 2014***) et 2 millions de personnes sont déplacées (***Grünewald, 2010***) .

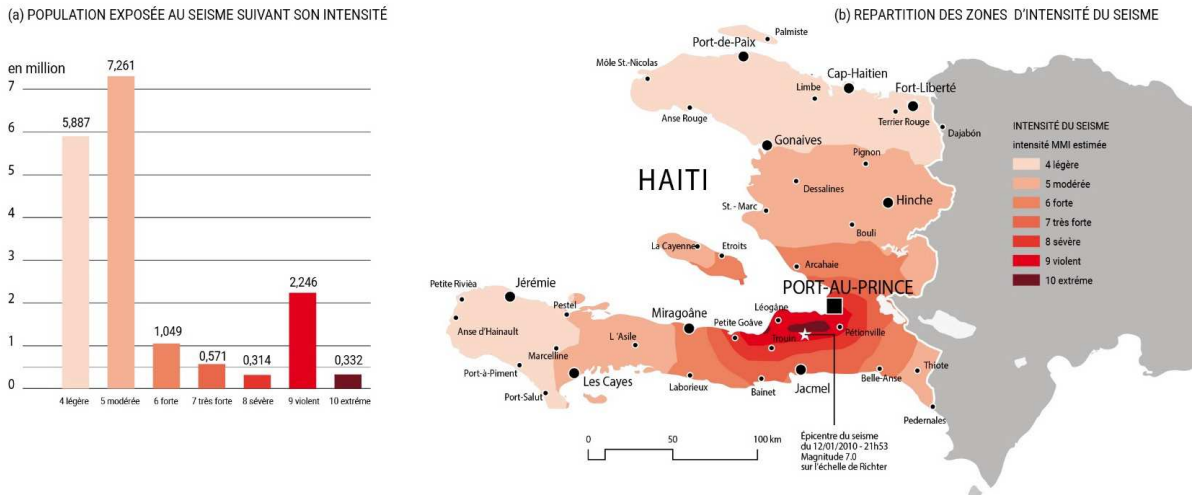


Figure 53 : Population exposée au séisme de 2010 par niveau d'intensité (a) et répartition des zones d'intensité du séisme (b) (Joffroy et al., 2014)

Ces chiffres considérables sont expliqués par plusieurs facteurs dont, la part de population exposée (en million) en fonction des intensités estimées du séisme de 2010 (Figure 53). On y voit qu'une part importante de la population (plus 3 millions) est située dans les zones d'intensités supérieures à 7 (sévère). De plus, l'heure du séisme est importante pour comprendre la fatalité de l'événement. Comme le souligne l'étude en temps réel de la gestion de crise menée par Grünewald et Renaudin (***2010***), 16h53 (heure locale) est « une heure où beaucoup de personnes étaient encore au travail ou en train de le

quitter et les enfants encore dans les salles de cours. Si le séisme avait eu lieu dans la nuit, les pertes auraient sans doute été beaucoup plus élevées ». De plus, il est généralement admis que la mortalité causée par un séisme est principalement liée à l'endommagement des structures (***Coburn et al., 1992***). Durant l'événement de Haïti, ce sont plus de 97 000 maisons qui ont été détruites et 188 000 endommagées (***USGS, 2010***[31]).

D'après le gouvernement de Haïti, les dommages matériels et les pertes sont estimés à près de 8 milliards de dollars $US, soit plus de 120% du PIB du pays en 2009 (***Eberhard et al., 2010***). Un chiffre revu à la hausse et qui estime les dommages à près de 14 milliards de dollars $US (***Klett, 2011***). Une catastrophe dont les conséquences, souvent comparées à celles du tsunami de 2004, ont mobilisé l'intervention des technologiques d'observation de la terre dans le but d'assister les processus de gestion de crise et *post*-crise.

Une catastrophe cartographique :

Cette catastrophe a engendré un nombre important de cartes thématiques visant à appuyer la gestion de crise localement (cf. supra 3.3.2). Cette production pléthorique, rapidement disponible et dont les modes de représentation ont été très variés, a conduit les chercheurs à s'interroger sur les conséquences d'une telle production sur l'interprétation du message cartographique par le lecteur. Cependant, aucune étude n'a été menée sur l'impact que représente une telle diversité de cartes. Nous avons proposé une expérimentation visant à confronter un groupe d'utilisateurs homogène à un échantillon de cartes produites à la suite du séisme de Haïti (2010). Cette expérimentation avait pour vocation d'approfondir notre réflexion sur le type de représentations cartographiques optimales pour diffuser efficacement et rapidement une information.

[31] *https://strongmotioncenter.org/NCESMD/data/haitiregion_12jan2010/eqinfo.htm#details*

6.1.2. Protocole de l'expérimentation #1

Hypothèses de départ :

Le processus de gestion de crise implique un nombre important de communications et d'interactions liées à l'information spatiale (***Kuvedžić Divjak & Lapaine, 2014; Staněk et al., 2010***). Cette dernière, à travers la carte, est considérée comme un des moyens les plus efficaces pour localiser, illustrer les relations, identifier les besoins et présenter un aperçu à la fois global et détaillé de la situation et des connaissances (***Bartram, 1980; Burkhard & Meier, 2005***). En gestion de crise, une carte dont la lecture est rendue difficile à cause d'une grande quantité d'informations graphiques est considérée comme inefficace (***Staněk et al., 2010***). De plus, se pose un problème lié au « message esthétique » de la carte (***Rimbert, 1973***). Des erreurs d'interprétation peuvent survenir et être exacerbées dans le contexte particulier de la crise. Aussi, la grande diversité des cartes *post*-catastrophes pour un secteur similaire pose un souci de redondance des mêmes informations principales sur plusieurs cartes. De telles procédures sont considérées comme contre-productives, notamment pour des prises de décisions rapides sur des temps limités (***Kerle, 2013; Staněk et al., 2010***). À chaque carte, l'utilisateur doit réitérer un processus de cognition afin d'obtenir une information similaire ou complètement nouvelle en fonction des représentations. L'ensemble de ces remarques amène à formuler 5 hypothèses :

- Hypothèse 1 (H1) : Nous avons cherché à connaitre la capacité d'une carte à communiquer une information et à la transmettre de manière identique, notamment lorsqu'une même tâche est effectuée sur un même support. Qui plus est, les réponses obtenues à cette tâche devraient être relativement similaires lorsqu'elles sont réalisées sur un échantillon de participants bénéficiant de la même formation et ayant un niveau cartographique équivalent.

- Hypothèse 2 (H2) : Dans un contexte où le temps est limité et conformément aux avantages de l'agrégation statistique, les cartes qui cherchent à simplifier l'information aux échelles intermédiaires à larges devraient permettre d'obtenir de meilleurs résultats pour la localisation des secteurs les plus touchés. De fait, l'agrégation statistique devrait également bénéficier d'une meilleure lisibilité de la part des participants.

- Hypothèse 3 (H3) : Toujours dans ce contexte, les variables visuelles de couleurs relativement proches entre les différentes techniques pourraient entraîner des conséquences sur l'interprétation des utilisateurs. Des erreurs d'interprétation pourraient survenir en fonction du type d'informations transmises par les différents modes de représentations sans que l'utilisateur ne les perçoive.

- Hypothèse 4 (H4) : Lors de l'analyse collective des cartes et pour la tâche de localisation des secteurs les plus touchés, nous supposons que les utilisateurs privilégieront les cartes dont les données perçues et interprétées seront redondantes.

- Hypothèse 5 (H5) : Pour finir, l'efficacité visuelle perçue des étudiants devrait favoriser les cartes fournissant un bon degré de certitude et de lisibilité en dépit des réponses fournies.

Les représentations analysées :

Pour cette expérimentation, les cartes ont été sélectionnées et téléchargées à partir de RELIEFWEB ou directement sur le site internet des producteurs de données. Cette sélection a priorisé les cartes qui illustrent les dommages à des échelles, des secteurs et des dates de productions relativement proches. Au total, ce sont 13 cartes qui ont été gardées et qui sont présentées dans les Figure 54 à Figure 56. Les cartes ont été regroupées en fonction des échelles cartographiques. Quatre d'entre elles présentaient les dommages à des échelles « larges » (très petites échelles) sur une étendue allant de Carrefour à Port-au-Prince. Quatre autres ciblaient les environs de Port-au-Prince à des échelles « intermédiaires » (petites échelles). Les cinq dernières se concentraient sur une portion de Port-au-Prince à des échelles « fines » (grandes échelles). Ces cartes ont été réalisées entre le 15 et le 26 janvier 2010. Pour chacun de ces regroupements scalaires, un cadre d'étude (Figure 54 à Figure 56) a été défini. Il a permis de borner spatialement la réalisation de tâches consistant à l'évaluation des dommages. Ces derniers étaient représentés sur l'ensemble des cartes analysées par le biais de 7 techniques distinctes en fonction des échelles :

- Aux échelles « larges » : L'interpolation qualitative (A), le maillage hétérogène par blocs urbains (B), le carroyage homogène par mailles carrées (C) et la représentation ponctuelle (D).

- Aux échelles « intermédiaires » : la représentation ponctuelle (E), la représentation par surface endommagée du bâtiment individuel à des groupements de bâtiments (F), le maillage hétérogène par blocs urbains (G) dont l'un a la particularité d'utiliser le centroïde des surfaces créées à partir des blocs urbains (H).

- Aux échelles « fines » : L'interpolation qualitative (I) et quantitative (J), le maillage hétérogène par blocs urbains (K), le carroyage homogène par mailles carrées (L) et la représentation ponctuelle (M).

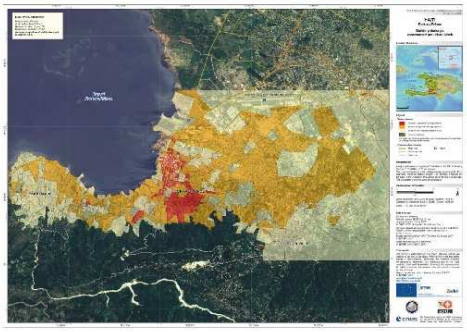


(A)



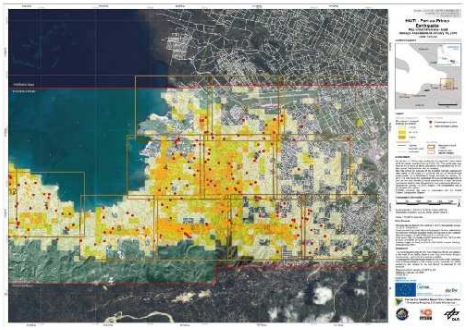
UNITAR UNOSAT : Intensity of building damage across Port-au-Prince & Carrefour, Haïti (18-20/01/2010)
Cette carte présente une interpolation de surface analysant l'intensité des dommages aux bâtiments.
L'endommagement est classé à partir du système de classification EMS-98.

(B)



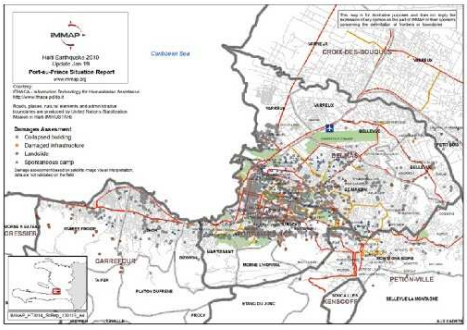
SERTIT : Building damage assessment per urban block (produite le 15/01/2010)
La carte représente une évaluation initiale des dommages aux bâtiments par une estimation de la proportion de bâtiments observés qui présentent des dommages.
L'information est agrégée à l'aide d'un maillage hétérogène créé à partir de la découpe de polygone en fonction du linéaire routier.

(C)



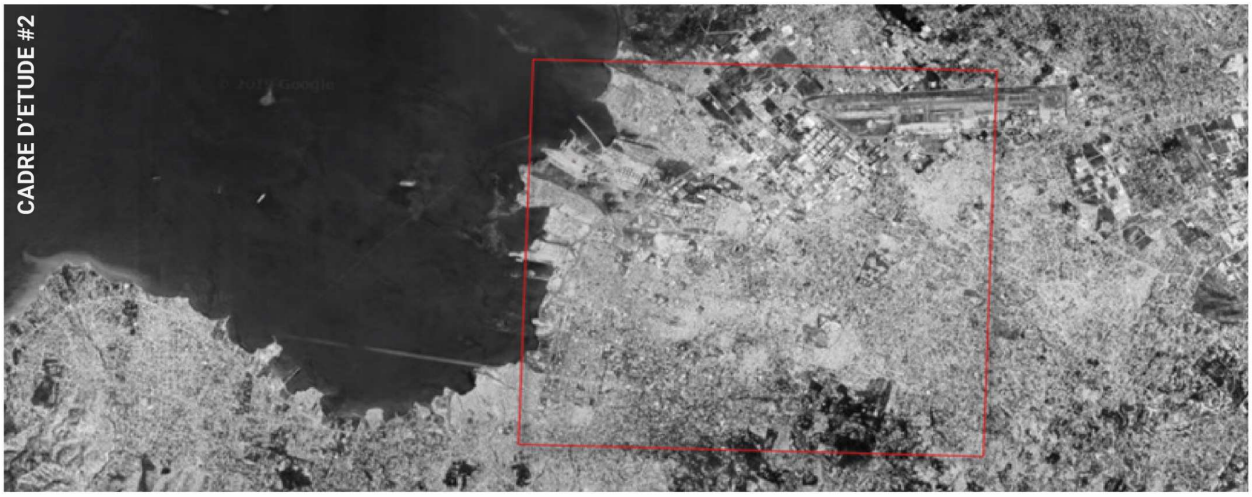
DLR ZKI : Map Sheet Overview damage assessment (produite le 16/01/2010)
La carte montre le pourcentage des structures endommagées par l'intermédiaire d'un carroyage homogène de mailles carrées d'une dimension de 250 mètres par 250.
Les dommages sont estimés à partir des données dérivées de l'interprétation visuelle des images satellites.

(D)

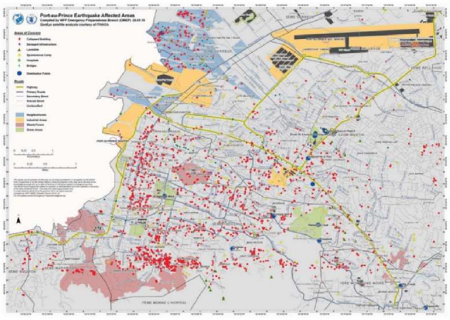


iMMAP : Port-au-Prince Situation Report (produite le 19 /01/2010)
Cette carte présente les dommages analysés par interprétation visuelle basée sur l'imagerie satellite. L'évaluation est ensuite reportée par implantation ponctuelle afin de localiser les bâtiments détruits et les infrastructures endommagées.

Figure 54 : Échantillon de cartes du cadre d'étude #1 (échelles cartographiques larges)

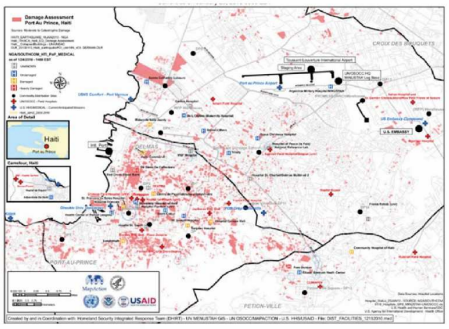


(E)



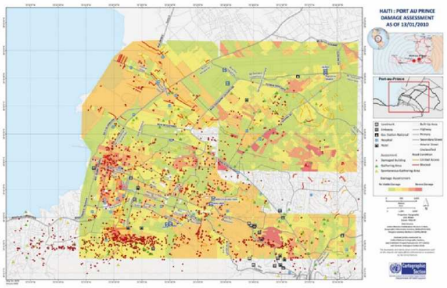
Ithaca : Earthquake affected areas (produite le 20/01/2010)
Cette carte est produite par le biais d'une interprétation visuelle des dommages basées sur l'imagerie satellite. L'évaluation donne lieu à une implantation ponctuelle au bâti en catégorisant les structures détruites et celles endommagées.

(F)



USAID : Damage assessment and field medical locations (26/10/2010)
Cette carte présente les dommages par l'intermédiaire de surfaces endommagées du bâtiment individuel à des groupements de bâtiments.

(G)



UNCS : Damage assessment (produite le ?/01/2010)
La carte représente une évaluation des dommages aux bâtiments par l'intermédiaire des données dérivées de l'interprétation visuelle des images satellites. L'information est agrégée à l'aide d'un maillage hétérogène créé à partir de la découpe de polygone en fonction du linéaire routier.

(H)

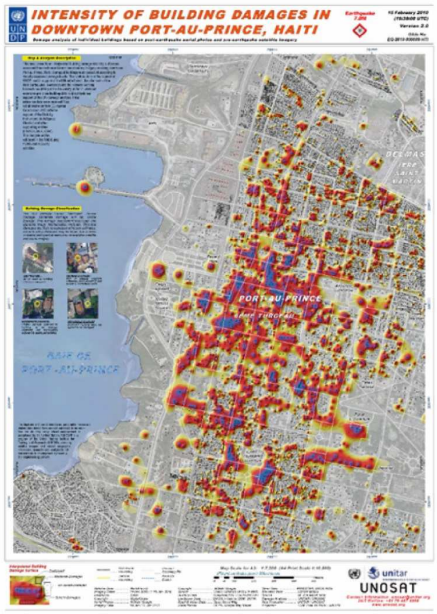


G-Mosaic : Damage assessment for the Haïti Earthquake (produite le 18/01/2010)
Cette carte présente les dommages observés au bâtiment grâce aux images satellites. Les informations sont ensuite agrégées à l'aide d'un maillage hétérogène créé à partir de la découpe de polygone en fonction du linéaire routier et visualisées de manière ponctuelle par l'intermédiaire du centroïde des surfaces créées par le maillage.

Figure 55 : Échantillon de cartes du cadre d'étude #2 (échelles cartographiques intermédiaires)



(I)



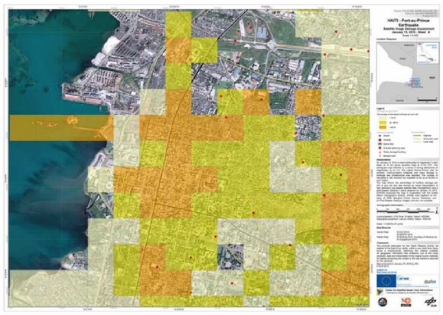
UNITAR UNOSAT : Intensity of building damage in downtown Port-au-Prince (15/01/2010)
Cette carte présente une interpolation de surface analysant l'intensité des dommages aux bâtiments. L'endommagement est classé à partir du système de classification EMS-98.

(J)



SERTIT : Densité de bâtiments endommagés (produite le 15/01/2010)
Cette carte traite les dommages par surface de comptage d'un cercle de 0.1km² afin de créer un représentation par densité de Kernel (îlots de chaleur).

(L)



DLR ZKI : Satelllite image damage assessment (produite le 15/01/2010)
La carte montre le pourcentage des structures endommagées par grille de 250*250 et est dérivé de l'interprétation visuelle des images satellites.

(K)



SERTIT : Catalogue des bâtiments endommagés (produite le 18/01/2010)
La carte montre les niveaux de dommages estimés à partir des structures endommagées observables par photo-interprétation. Les données sont aggrégées par l'intermédiaire d'un maillage hétérogène créé à partir de la découpe de polygone en fonction du linéaire routier.

(M)



SERTIT : Catalogue des bâtiments endommagés (produite le 18/01/2010)
Cette carte localise les bâtiments endommagés par l'intermédiaire d'une représentation ponctuelle

Figure 56 : Échantillon de cartes du cadre d'étude #3 (échelles fines)

Utilisateurs mis à l'étude :

Cette expérimentation a été réalisée auprès de 21 participants. Tous sont issus d'une promotion de première année d'un master spécialisé dans la gestion des catastrophes et des risques naturels (Master 1 Géographie parcours GCRN, 2019). Cette formation intègre une pratique avancée de la cartographie notamment par l'intermédiaire des SIG. Parmi les étudiants, nous avons compté 5 femmes et 16 hommes pour une moyenne d'âge de 22 ans.

Les tâches à accomplir :

L'étude qui suit a été réalisée dans le but d'exploiter la diversité des cartes produites à la suite du séisme de Haïti en 2010. Elle avait pour objectif de mesurer la capacité d'un échantillon de cartes à transmettre une information de manière individuelle et d'en faire ressortir des tendances générales par l'interprétation collective. Pour cela, l'expérimentation a consisté dans un premier temps à la réalisation de cinq tâches principales pour chacune des cartes échantillonnées. Ces tâches sont décrites en Figure 57 et se présentent sous la forme d'un questionnaire à remplir par les participants (cf. annexe 1).

La tâche *T1* fait office d'introduction à l'analyse de chaque carte. Une question concernant « l'objet de la carte » a été placée dès le début afin que l'utilisateur prenne le temps d'assimiler la nouvelle figure et le type de données qu'elle présente. Selon la taxonomie des tâches de recherche décrite par Munzner (***2014***), la tâche *T2* se classe dans la catégorie de localisation (locate) puisque l'utilisateur sait ce qu'il doit chercher (target known), mais il ne connait pas sa localisation exacte (location unknown).

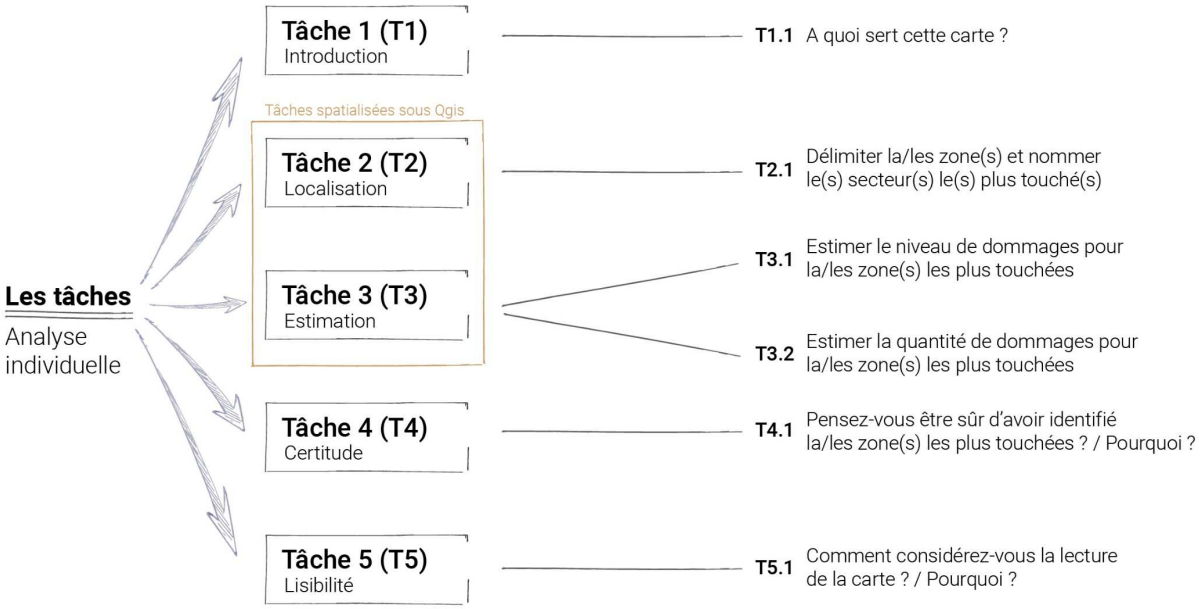


Figure 57 : Liste des tâches à accomplir pour l'expérimentation #1

Les tâches *T3* sont classées dans la catégorie d'estimation (*lookup*). À partir des recherches effectuées en amont, l'utilisateur connait la localisation de ce qu'il cherche (*location known*). En complément de ces tâches de localisation et d'estimation, les utilisateurs ont effectué une tâche de vectorisation sous SIG (Qgis) des zones les plus touchées. Pour cela, ils se sont aidés des cartes qui ont été préalablement

géoréférencées. La tâche *T4* a été intégrée afin de fournir une information sur le niveau de certitude des réponses fournies pour chaque participant lors de l'analyse d'une carte (certitude). Son estimation a été détaillée en 5 classes sur la base de l'échelle de Lickert (***Likert, 1932***) : *tout à fait sûr ; sûr ; ni sûr, ni pas sûr ; pas sûr ; pas du tout sûr* . Cette dernière a permis de nuancer le degré d'accord d'un individu en utilisant une graduation comprenant en général 5 à 7 niveaux de réponses. Ainsi, le traitement quantitatif des données recueillies a pu être réalisé autour d'une valeur centrale (3 pour le cas de 5 classes) et des variables négatives (-2) et positives (+2). Une section explicative ouverte a servi à l'utilisateur de décrire les critères de sa réponse. Le niveau de certitude faisait directement référence à la confiance accordée par le participant à la donnée qu'il interprétait et aux informations qu'il pouvait transmettre. Bien évidemment, ce niveau de certitude n'est pas uniquement dépendant de la technique utilisée servant à représenter les dommages. Il est influencé par la qualité générale de la carte et notamment par son niveau de lisibilité. Pour cela, la tâche *T5* a donné lieu à l'estimation de la capacité de la carte à fournir une lecture facile ou non de l'information recherchée (lisibilité). Cette lisibilité a également été détaillée en 5 classes : *très facile ; facile ; ni facile, ni pas facile ; pas facile ; pas du tout facile*. Une section ouverte a aussi été intégrée afin de laisser l'utilisateur expliquer son choix.

Dans un second temps, l'utilisateur a dû analyser l'ensemble des cartes (analyse collective) et répondre aux tâches énoncées dans le questionnaire (Figure 58). Il s'agit de l'équivalent des tâches *T2* (localisation), *T3* (estimation) et *T4* (certitude) auxquelles se rajoutent les tâches *T6* (repérage) et *T7* (Classification). La tâche *T6* a consisté à identifier les éléments qui ont servi à la réalisation de *T2. Les* tâches *T7* ont demandé à l'utilisateur de classer les cartes en fonction de leur efficacité visuelle (*T7.1*).

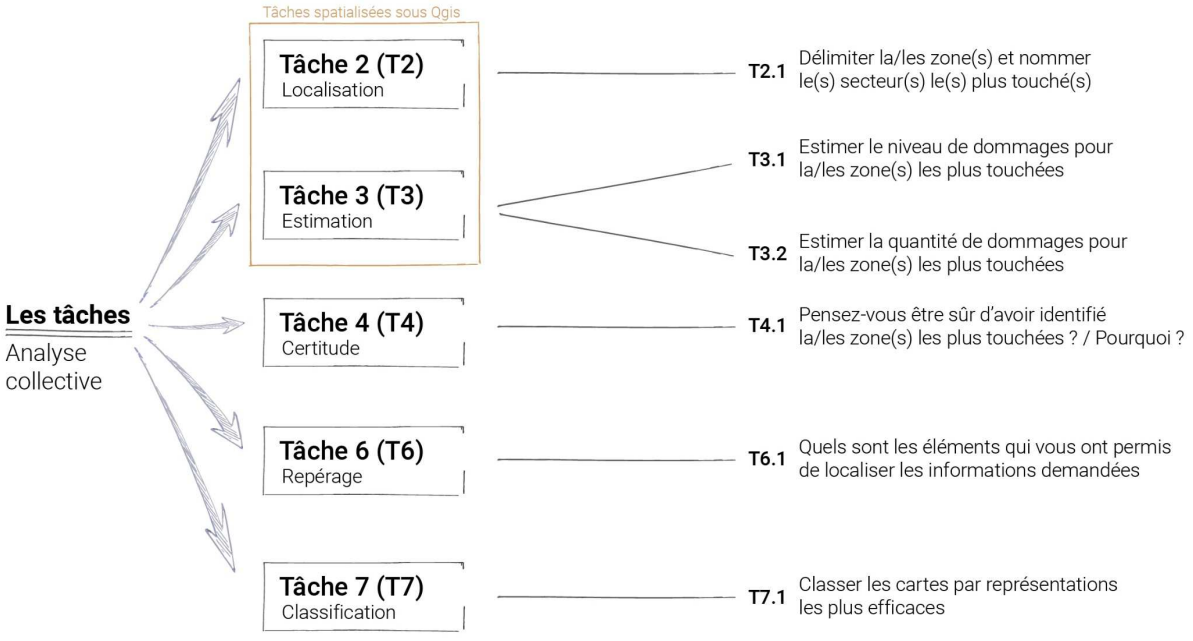


Figure 58 : Liste des tâches à accomplir pour l'analyse collective des cartes

La procédure :

Le contexte de l'étude a été présenté aux étudiants avant que ne débute le test. Cette étape, d'une durée de trente minutes environ, a consisté à présenter l'événement étudié, ses caractéristiques physiques et le contexte du territoire touché. Une présentation générale des cartographies *post*-catastrophes a également été introduite. L'objectif était de les faire réfléchir sur les tâches attendues vis-à-vis de ce type produit et d'établir un langage commun avec eux. Ce processus a facilité le traitement des résultats en évitant une taxonomie et une sémantique trop différentes entre les réponses.

Une fois le contexte et les enjeux établis, l'expérimentation a été réalisée sur une plage horaire d'environ 2h. Durant cette période, les 13 cartes échantillonnées (Figure 54 à Figure 56) ont été affichées individuellement par intervalles de 10 minutes. L'affichage des cartes s'est fait sous SIG (Qgis) sur des postes de travail individuel. Cette condition a donc impliqué qu'un travail de géoréférencement des cartes ait été réalisé par nos soins en amont. L'ordre de visionnage des cartes a été exécuté de manière aléatoire afin de réduire les processus d'apprentissage. Ces derniers peuvent avoir lieu lorsque plusieurs cartes sont analysées à des échelles similaires par exemple. Pour cela, nous avons fait varier les échelles et les modes de représentations. À chaque visionnage, les étudiants ont été chronométrés. Ce procédé a été réalisé afin d'une part de garantir des réponses pour l'ensemble des cartes étudiées et d'autre part, de simuler un effet de stress. L'analyse de la carte a été décomposée en deux étapes (Figure 59). Une première phase a consisté à répondre aux tâches de localisation et d'estimation des dommages puis à vectoriser sous SIG les zones plus touchées au sein des cadres d'étude prédéfinis (étape #1). Une fois l'ensemble des cartes visionnées individuellement, 15 minutes ont été accordées aux étudiants afin de procéder à l'analyse collective de toutes les cartes (étape #2). Les deux procédés étaient similaires. Les étudiants ont répondu aux questions figurant sur le questionnaire et ont vectorisé les secteurs qui, à la vue de l'ensemble des cartes, leur paraissaient les plus touchés.

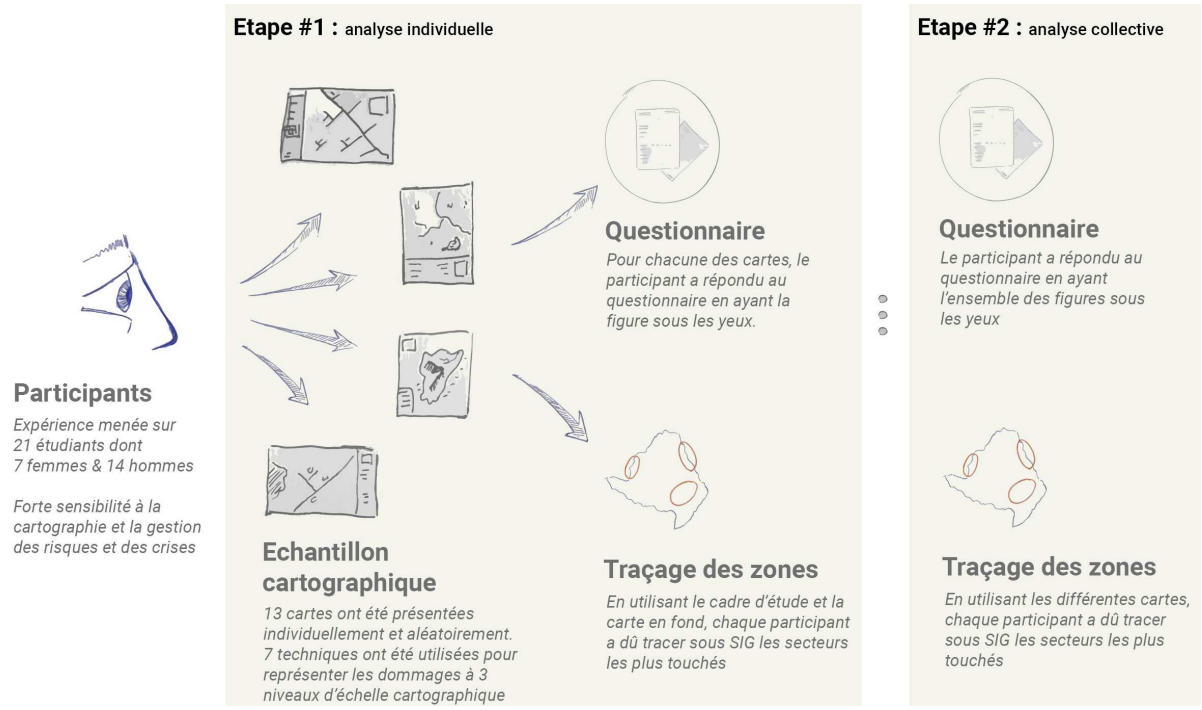


Figure 59 : Synthèse de la procédure de la phase active de l'expérimentation #1 : individuelle et collective

Une fois ces deux étapes accomplies, un temps de libre parole a été donné. Celui-ci a permis aux participants d'exprimer leurs ressentis et opinions quant à l'objectif de ce travail et sur les cartes qui ont été analysées.

6.1.3. Traitement et exploitation des résultats de l'expérimentation #1

Base de données et traitement des réponses aux questionnaires :

La procédure a permis de récupérer 273 questionnaires individuels pour les 13 cartes testées auprès des 21 participants. 1365 données ont été répertoriées dans une base de données afin d'être analysées et comparées. En complément, 147 données concernant l'analyse collective des cartes ont également été intégrées. Pour chacune des cartes, les participants avaient la possibilité d'identifier 4 zones. Les réponses étaient ouvertes et comme nous le verrons ultérieurement les étudiants ont formulé ces dernières de trois façons différentes. Malgré le travail de préparation en amont, les réponses retranscrites sur le questionnaire ont été très hétérogènes. Il a été d'autant plus difficile de cibler parfaitement, sans émettre des erreurs d'interprétation subjective, les zones identifiées par les participants. Nous avons donc préféré analyser la capacité des participants à fournir par écrit des secteurs précis et identiques par carte, mais également à estimer le type d'informations (quantitatives et/ou qualitatives). L'exactitude des réponses aux tâches de localisation a pu néanmoins être analysée grâce à la tâche de vectorisation sous SIG (T2).

Analyse cartographique des taux de convergences :

Les zones vectorisées sous SIG par les étudiants ont été récupérées et transférées vers un même projet. La procédure a ainsi permis de récolter 273 couches vectorielles (zones les plus touchées). Un premier traitement a permis de mesurer la convergence des vecteurs fournis par les différents participants. La procédure a consisté à superposer et regrouper les différentes couches en une seule (Figure 60).



Figure 60 : Processus de collecte du pourcentage de chevauchement des secteurs tracés par les participants

Pour ce faire, trois carroyages réguliers ont été créés selon l'emprise des différents cadres d'étude. Ils ont été réalisés à partir d'un maillage hexagonal de dimensions variables, allant de 200*200 mètres pour les cartes [A ; B ; C ; D ; E ; F ; G ; H] du cadre d'étude 1 et 2 et de 100*100 mètres pour les cartes [I ; J ; K L ; M] du cadre d'étude 3. Cette amplitude s'explique par des échelles cartographiques différentes et une volonté de garder une résolution suffisamment fine dans l'extraction des zones vectorisées. Une intersection a ensuite été réalisée entre les zones les plus touchées et le réseau de mailles. Une fois découpée, l'aire des vecteurs de sortie a été calculée. Puis, elle a été ramenée au pourcentage de surfaces qu'elle occupait dans la dimension d'une maille. Cette technique a eu pour but de supprimer les aires trop petites (inférieures à 30% de la superficie totale d'une maille) et de limiter les effets de bords indésirables (Figure 61). Seules les surfaces représentatives ont ainsi été préservées.

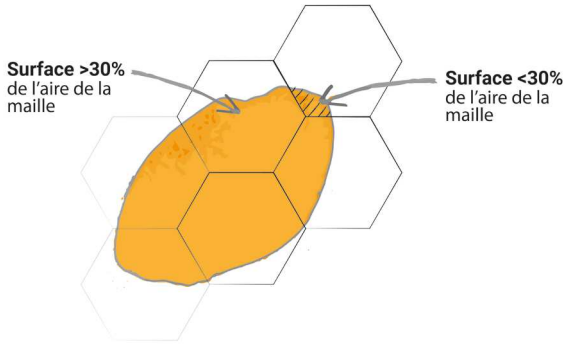


Figure 61 : Filtrage des aires supérieures à 30% de la surface totale d'une maille

Une fois ce premier filtrage réalisé, une fonction a été utilisée afin de créer des points pour chaque vecteur restant. Ces points ont été produits à partir de leur centroïde. L'étape suivante a consisté à réaliser une jointure attributaire par localisation tout en intégrant une fonction de résumé statique. Cette méthode a été employée afin de produire la somme du nombre de points recensés dans chaque maille de découpage (Figure 62). Pour finir, cette somme a été comparée aux nombres maximums de points que peut contenir une maille qui regroupe 100% des participants. Ce calcul a été traduit par un pourcentage de chevauchement permettant de spatialiser l'interprétation cumulée (zones de convergences) des participants pour chacune des cartes. Les pourcentages de chevauchement ont été classés en fonction des quartiles : 0-25%, 25-50%, 50-75% et 75-100%. Grâce à ce travail d'homogénéisation, nous avons pu comparer d'une part le taux de convergence des zones tracées pour une même carte et d'autre part les taux de convergence entre les différentes cartes regroupées au sein de chaque cadre d'étude.

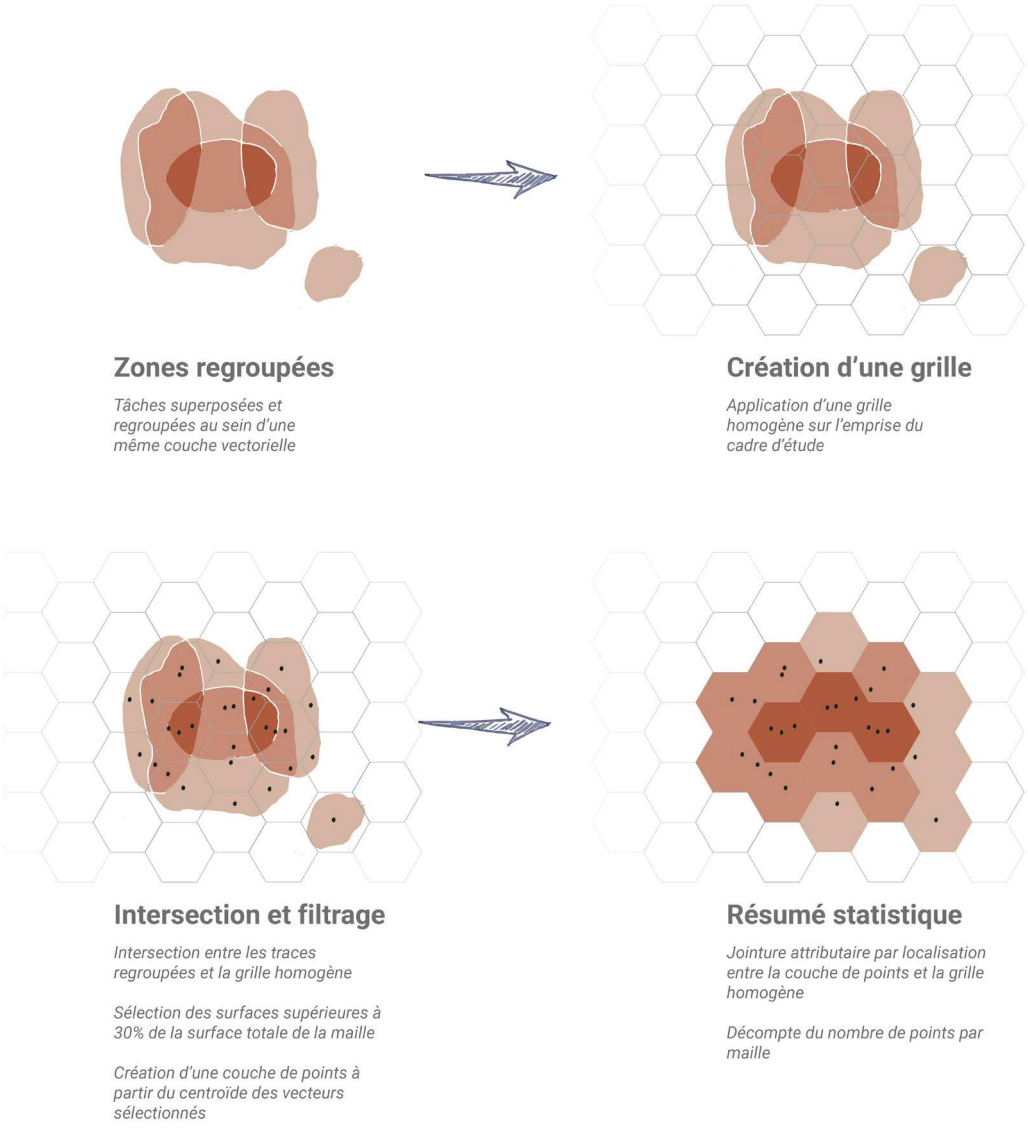


Figure 62 : Résumé statistique par maille homogène des zones vectorisées par les participants

Dans un second temps, les taux de convergence les plus hauts (supérieurs ou égaux à 75%) ont été analysés par rapport aux résultats attendus des différentes cartes. Pour identifier ces derniers, nous avons demandé à deux scientifiques thématiciens de la cartographie des risques et des impacts *post*-catastrophes du laboratoire LAGAM de mener la même expérience, mais cette fois-ci sans limites de temps. Les zones vectorisées par les deux scientifiques ont par la suite été regroupées et comparées selon le même principe que la Figure 60. Les carroyages utilisés étant identiques, il a été possible de superposer les plus hauts taux de convergences (supérieurs ou égaux à 75%) des scientifiques à ceux des participants.

6.2. Résultats de l'expérimentation #1

6.2.1. *La communication textuelle des zones les plus touchées et leur estimation*

Analyse individuelle des cartes :

Les résultats ont témoigné de la difficulté que les participants ont pu rencontrer pour nommer précisément les secteurs les plus touchés. En effet, les cartes ne présentaient pas le même degré de précision quant aux toponymes ou autres éléments cartographiques utiles à la transmission d'une localisation. Cela a abouti à une plus grande diversité des réponses obtenues (Figure 63). En outre, les étudiants ne connaissaient que très peu le territoire de Haïti. Il leur était donc impossible de faire appel à leur connaissance pour donner des localisations autres que celles affichées sur les cartes.

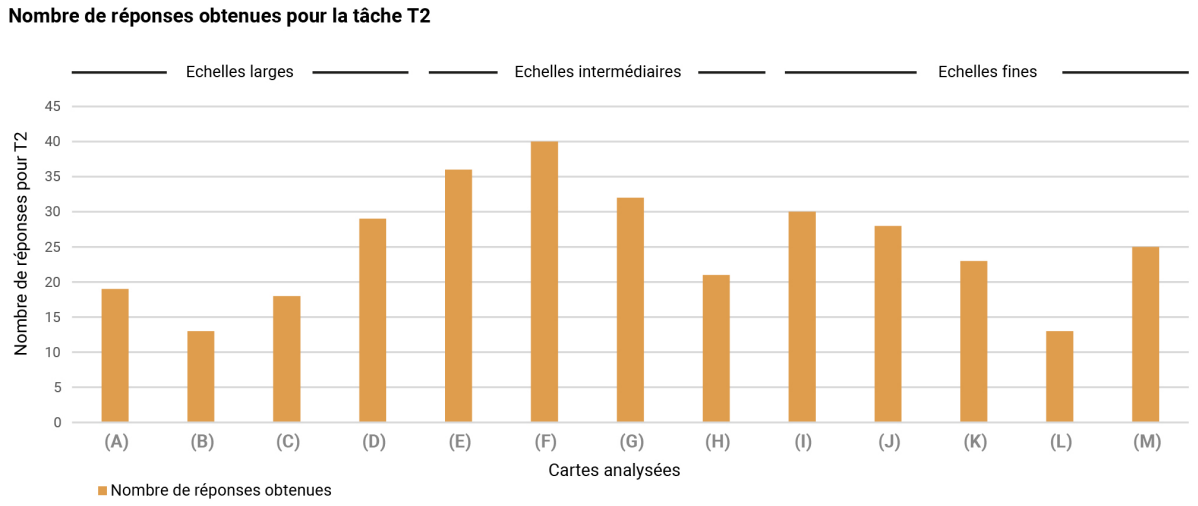


Figure 63 : Nombre de réponses différentes obtenues (y) par carte (x) à la tâche 2 : délimiter la/les zone(s) et nommer le/les secteur(s) les plus touchés(s) (expérimentation #1)

Lorsque les cartes n'avaient pas de toponymes, les étudiants ont indiqué de manière très large les zones qu'ils ont estimé les plus touchées. C'est par exemple le cas des cartes (**B**) et (**M**), où ces zones sont indiquées sous des appellations telles que « Nord », « Sud-Ouest », « Est », etc. Alors même que ces secteurs sont bien plus détaillés dans les couches SIG que les étudiants ont pu dessiner (cf. infra). Pour les cartes (**E**), (**F**) et (**G**), les réponses ont été plus précises : « entre Croix des Bossales et Bas peu de choses » ou encore « entre Hospital Saint-Joseph et Grasse Children ». Les participants se sont servis des nombreux toponymes (lieux habités, réseau routier) afin d'orienter plus finement leurs réponses.

Hormis quelques cas, il semble également que la majorité des participants a répondu à l'ensemble des tâches T3 (Figure 64, 1). Toutefois, seule l'analyse des cartes (**G**) et (**H**) et (**I**) ont présenté des pourcentages de réponses égaux ou proches de 100% pour la tâche T3.1. Ces résultats posent un premier problème. Rappelons que la nature des réponses attendues était d'ordre qualitatif (estimer le niveau d'endommagement) et quantitatif (estimer la quantité de bâtiments endommagés). Or, certaines cartes ne fournissaient que l'une de ces deux informations. Comme l'illustre la Figure 64 (2), les participants ont fourni des réponses quantitatives pour les cartes (**A**), (**F**) et (**H**) alors que ces dernières ne présentaient qu'une information strictement qualitative. Pareillement, les étudiants ont estimé un

niveau d'endommagement alors que les réponses possibles pour les cartes (**B**), (**J**), (**K**) et (**M**) étaient strictement quantitatives.

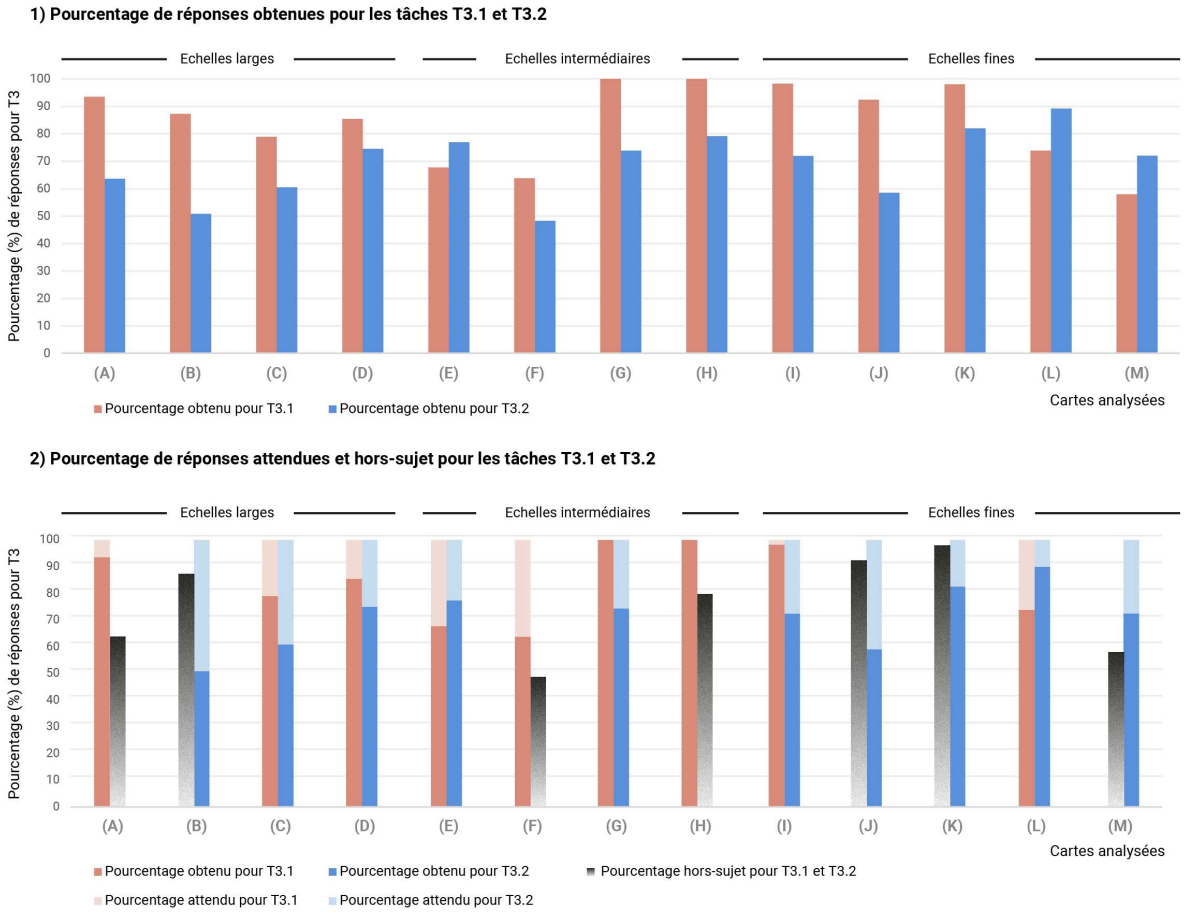


Figure 64 : 1) Pourcentage de réponses (y) obtenues pour les tâches T3.1 et T3.2 par carte (x) et 2) Pourcentage de réponses attendues et hors sujet pour les tâches T3.1 et T3.2 (expérimentation #1)

Au sein de ces réponses hors sujet, l'analyse des résultats a montré également des estimations qui ne sont pas répertoriées parmi les éléments de légende. C'est par exemple le cas de la carte (**B**), dont 33% de ces réponses hors sujet se sont basées sur la légende (dommage évident : >40%, dommage évident, mais sporadique : 11-40%, éparse ou non visible : 0-10%) pour fournir une estimation qualitative tandis que 54% utilisent des termes tels que : destruction, dommage très important, dommage important, etc.

De la même manière, les réponses n'étant pas hors sujet ont présenté également certaines problématiques d'interprétation (Figure 65). C'est par exemple le cas de la carte (**C**), où l'estimation du niveau de dommage était donnée par un figuré ponctuel indiquant uniquement les bâtiments totalement endommagés. Pour cette figure, une grande partie des réponses fournies par les étudiants n'a pas pris pas en compte cette information. Les estimations ont varié de la destruction, aux dommages moyens, voire faibles, mais elles se sont fondées également sur les éléments de légende quantitative (pourcentage de bâtiments endommagés par maille).

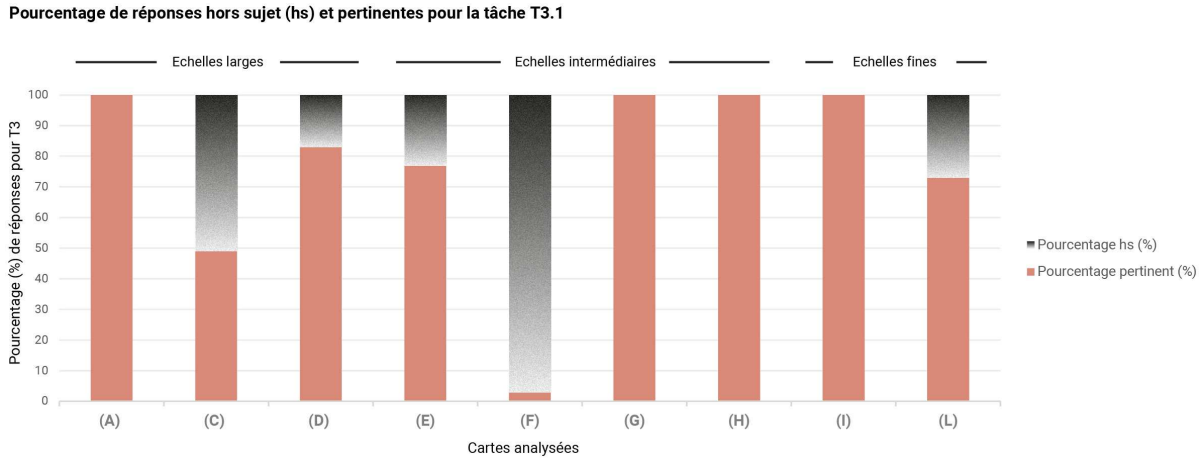


Figure 65 : Taux de réponses hors sujet (hs) et pertinentes (y) pour la tâche T3.1 pour chaque carte qui présente une information permettant d'estimer les niveaux de dommages (expérimentation #1)

Dans le cas de la carte (**F**), le taux de réponses hors sujet a été important. 97% des estimations n'ont pas pris pas en compte les éléments de légende qui caractérisaient les surfaces de bâtiments touchés. Ces derniers étaient caractérisés par une implantation surfacique rouge qui indiquait une fourchette des dommages de « modérés à catastrophiques », ceci sans en faire la distinction. Pourtant, les étudiants ont attribué des niveaux allant du « faible » à la « destruction ».

Analyse collective des cartes :

Les résultats issus de l'analyse collective des cartes ont montré une faible utilisation des toponymes présents sur les cartes. En effet, sur les 22 types de réponses obtenues, 8 d'entre elles ont mobilisé les toponymes afin de cibler précisément un lieu. Par ailleurs, à la question : quels sont les éléments qui vous ont permis de transmettre l'information demandée ? Seulement 28.6% des réponses ont concerné les toponymes contre 81% pour les codes couleur utilisés. Ces résultats ont souligné l'importance de cette variable et la façon dont elle a été mobilisée dans les cartes. Cette diversité relative des réponses écrites a offert néanmoins des localisations assez proches. Dans la section suivante, nous verrons que les secteurs les plus cités dans le questionnaire, à savoir : le centre-ville et le sud, sont également ceux qui sont les plus cités lors du calcul du taux de superposition des zones vectorisées sous SIG par les étudiants (analyse collective).

6.2.2. *Cartographier la convergence et la divergence de plusieurs interprétations*

Analyse individuelle des cartes :

Comme annoncé plus haut, l'objectif de cette première approche était de faire émerger au sein d'une même carte les zones de convergence produites par une pluralité d'interprétations. Ces zones de convergence s'expriment spatialement à travers le pourcentage de citations récupéré à l'aide du maillage régulier. Ces résultats ont été regroupés en fonction des trois cadres d'étude et visibles dans les Figure 67 (1) et Figure 68 (2-3). Ainsi, nous avons pu observer pour chacune des cartes les zones où plus de 75% des étudiants ont estimé qu'elles étaient les plus touchées (endommagées) par le séisme de Haïti en 2010. Ces figures ont également permis d'examiner les zones qui ont été progressivement moins citées par l'ensemble des 21 participants, jusqu'à être inférieurs à 25% (entre 1 et 5 étudiants). Lors de l'analyse de ces résultats, il a été important de considérer les effets de chevauchements des couches qui ont été découpées puis décomptées à l'échelle des mailles. Par exemple, les seuils (0-25%) ont proposé deux interprétations : des secteurs isolés qui contenaient une à cinq citations complètement indépendantes des autres classes, ou bien, des zones plus vastes qui débordaient des classes supérieures (Figure 66).

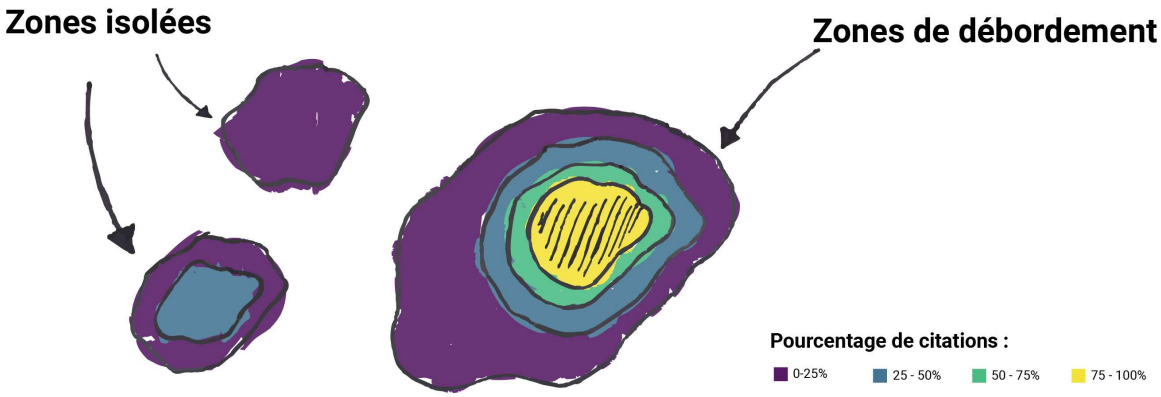


Figure 66 : Interprétation possible des pourcentages de citations

Analysées individuellement, ces cartes ont offert un premier constat. Celui de zones dont les seuils de convergence les plus hauts (75-100%) ont souligné une logique visuelle spécifique à chaque type de représentation. Parmi les cartes du cadre d'étude #1 (Figure 67,1), il semble que ce soit la carte (**A**) qui a offert les meilleurs niveaux de convergence. En effet, les quatre classes de pourcentage de citations (0-25% ; 25-50% ; 50-75% ; 75-100%) ont donné lieu à une meilleure concentration des interprétations et cinq principales zones se sont détachées. Elles correspondaient aux secteurs dont les tâches formées par l'interpolation étaient les plus saillantes visuellement. Pareillement, pour la carte (**B**) une part supérieure à 50% des participants a ciblé les zones du centre, Sud et Sud-Est de Port-au-Prince. Ces secteurs ont été délimités à partir de l'emprise des blocs urbains rouges correspondant aux « dommages évidents ». Cependant, notons qu'une part non négligeable des étudiants, entre 25 et 50% (soit 5 à 10 participants sur les 21), a aussi vectorisé des secteurs à l'Est et à l'Ouest de Port-au-Prince. Ces derniers correspondaient aux blocs urbains orange dont les dommages étaient « évidents, mais sporadiques (11-40%) ». Les résultats obtenus pour la carte (**C**) ont illustré quatre principales zones dont les taux de convergence étaient supérieurs à 75%. Seules des parts inférieures à 25% et plus ponctuellement entre 25 et 50% ont cité les secteurs qui se trouvent à l'Ouest. En analysant la carte d'origine, ces zones ont été

définies d'après la localisation des mailles orange qui indiquent « des pourcentages de bâtiments endommagés supérieurs à 40% ». Quant à la carte (**D**), une surface importante semble avoir fait l'unanimité auprès des participants. On s'aperçoit qu'elle prend en considération l'ensemble de l'agrégat qui était formé par les données ponctuelles visibles sur la carte d'origine. Une zone à l'ouest a été citée par un échantillon de 25 à 75% des étudiants.

Pour le cadre d'étude #1, il est donc apparu que chacune des cartes offre au moins une zone dont la majorité des participants a une interprétation commune. Cependant, le panorama des différents résultats illustrés en Figure 67(1) met en évidence que les cartes n'ont pas toutes donné la même projection des zones les plus touchées. Pourtant, les données d'entrées servant à l'agrégation des différentes techniques étaient sensiblement voire complètement identiques. L'écart entre les cartes (**A**) et (**D**) est particulièrement notable. Par ailleurs, le nombre de mailles contenant une citation a quasiment doublé entre ces deux cartes (Figure 69, 4-1). Le fait que la carte (**D**) n'ait pas présenté un nombre important de mailles dont le taux de citations est supérieur à 75% n'est pas synonyme d'une meilleure efficacité de cette représentation. Comme nous le verrons plus bas, cela peut être associé à des zones plus vastes, moins précises et plus incertaines qui ont été dessinées par les participants. Afin de mieux appréhender ces différences entre cartographies, nous avons cumulé les différents résultats en une seule et même carte (Figure 67,1-1). Les taux de citations ont été additionnés par mailles et ramenés à 84 (21 participants*4 cartes) afin d'en dégager des pourcentages de citations. Dès lors, seuls deux secteurs (> à 75%) se sont dégagés de ces différentes analyses individuelles, eux-mêmes englobés dans une zone plus large qui comprenait entre 50 et 75% des citations. Les zones de convergence supérieures à 50%, observables à l'Ouest dans les cartes (**A**) et (**D**), ont finalement été inférieures à 50% dans la Figure 67 (1-1). Ces zones de convergences ont donc été plus réduites que celles observables en figure (**A**), (**C**) et (**D**). La Figure 67 permet par comparaison d'estimer les zones de divergences entre cartes.

Les résultats des cadres d'étude #2 et #3 sont affichés en Figure 68 (2). Pour les cartes du cadre d'étude #2, le pourcentage de citations de la carte (E) a été plus important là où les agrégats de points se sont montrés les plus denses. Ce constat a également été observé pour la carte (**M**) du cadre d'étude #3. Concernant la carte (**F**), les zones de convergence supérieures à 75% ont été beaucoup plus réduites. Le secteur au Nord, observable également sur la carte (**E**), a été cité par une tranche de 50 à 75% des étudiants. La carte (**G**) qui utilise les blocs urbains a fait ressortir deux zones principales, délimitées par la forte concentration de polygones rouges, mais également de points qui indiquaient la localisation des bâtiments endommagés. Une part moins importante, mais non négligeable d'étudiants (25-50%) a ciblé des secteurs au Nord et au Nord-Est. Constat similaire pour la carte (**H**) dont les points rouges ont été majoritairement ciblés par les participants. Notons cependant la présence de cas isolés au Nord et au Nord-Est. Parmi les cartes du cadre d'étude #2, la carte (**E**) a offert les taux de convergences les plus importants (Figure 69). À l'instar des cartes du cadre d'étude #1, il apparait qu'au moins une zone a donné lieu à des taux de convergence supérieurs à 75%. Là encore, la vue d'ensemble de ces résultats a démontré la divergence qui pouvait exister sur les zones ciblées au sein des différentes cartes. L'analyse cumulée (Figure 68, 2-1) a révélé qu'une seule transparait à l'Ouest du cadre d'étude. Les secteurs au Nord ont été identifiés par 50 à 75% des citations tandis qu'entre 25 et 50% ont fait ressortir les secteurs au Nord-Est.

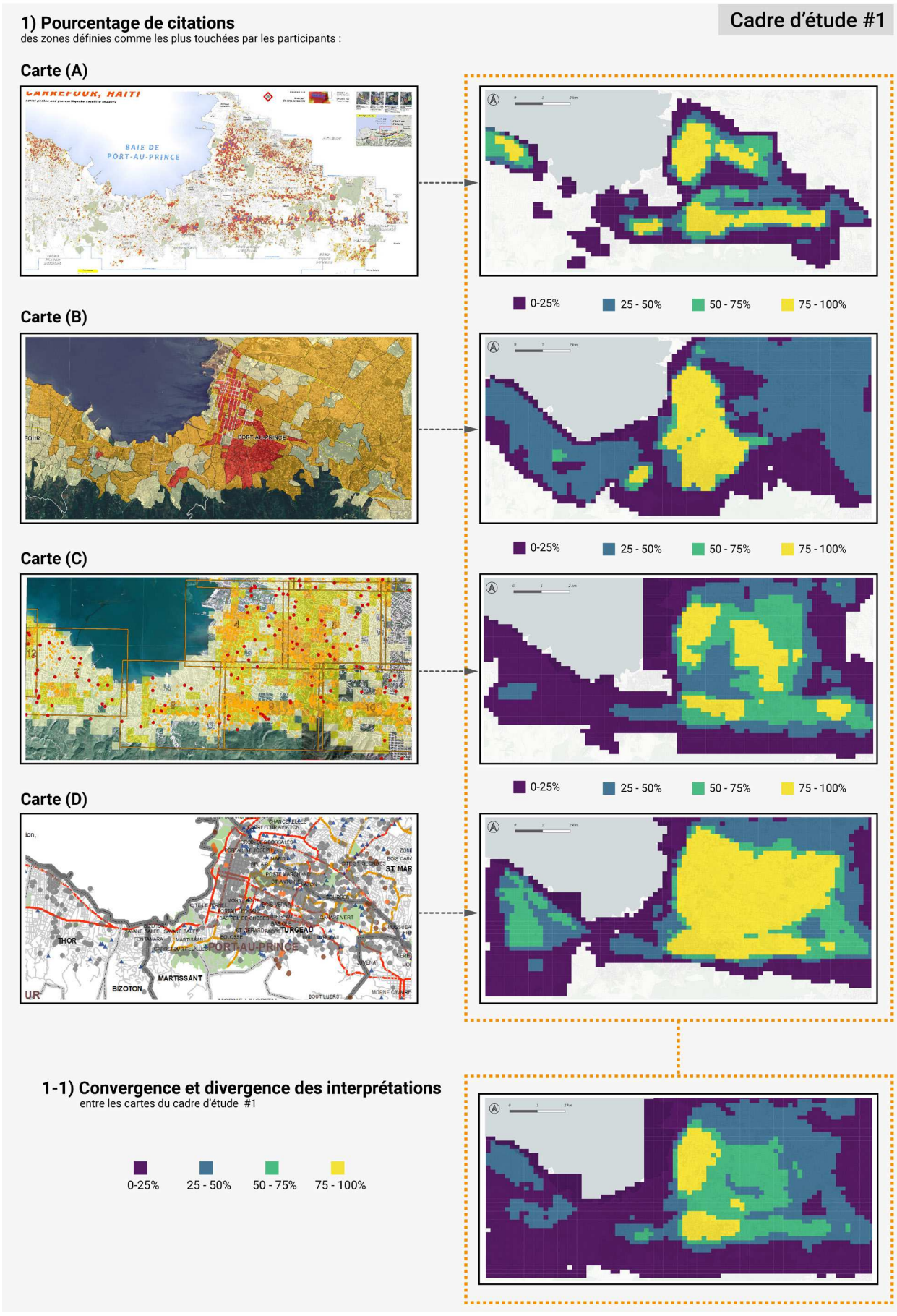


Figure 67 : Pourcentage de citations au sein des cartes du cadre d'étude #1, échelles larges (1), et synthèse des zones de convergence et de divergence des interprétations (1-1) (expérimentation #1)

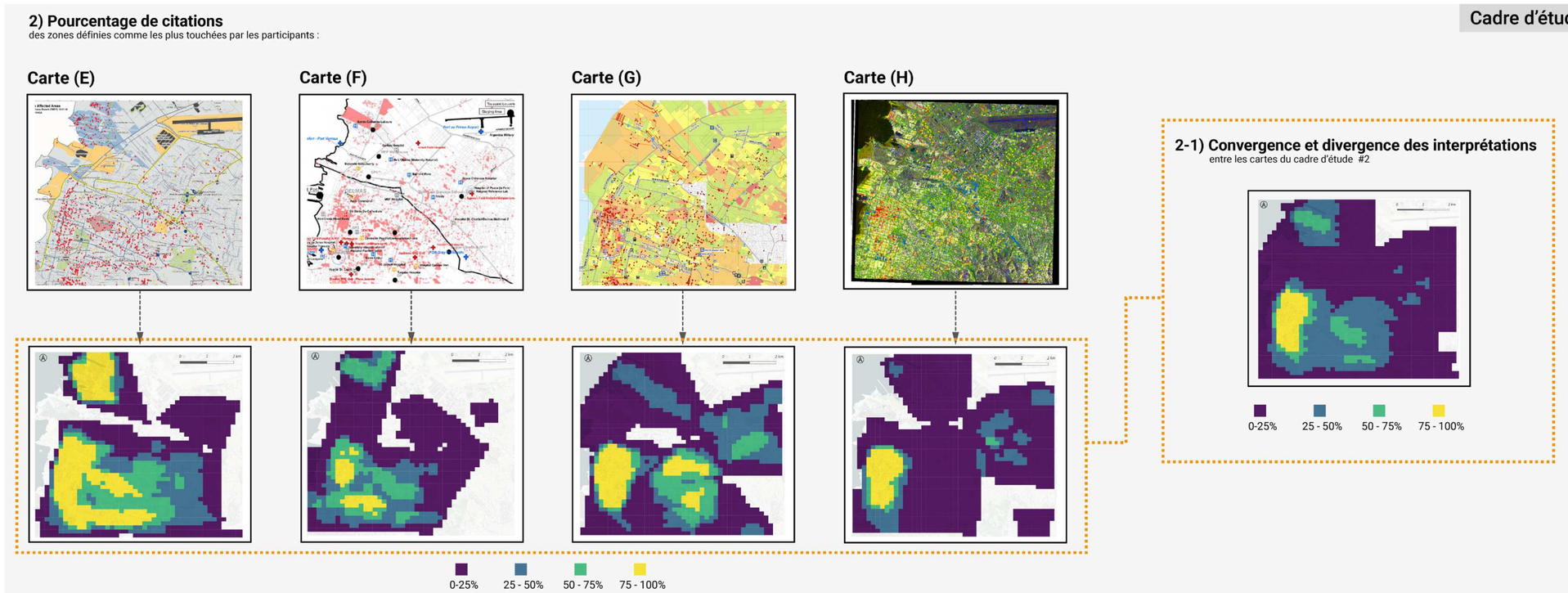


Figure 68 : Pourcentage de citations au sein des cartes du cadre d'étude #2, échelles intermédiaires (2), et du cadre d'étude #3, échelles fines (3) ; et synthèse des zones de convergence et de divergence des interprétations (2-1 et 3-1) (expérimentation #1)

Le cadre d'étude #3 regroupait les cartes à grandes échelles. Il n'est donc pas étonnant de constater que les pourcentages de mailles contenant des taux de citations supérieurs à 75% ont été les plus élevés parmi les cartes expérimentées (Figure 69, 4-2). Qui plus est, il est apparu que pour chacune des cartes les taux de citations compris entre 25 et 100% ont formé des surfaces proches avec très peu d'effets de débordement (Figure 68, 3). Seule la carte (**L**) a mis en avant une zone, au niveau de la marina, dont les taux de citations étaient compris entre 50 et 75% des participants. Ainsi, qu'importe la technique utilisée, l'analyse a démontré une plus grande convergence des interprétations individuelles. Constat qui a été confirmé après cumul des cartes du cadre d'étude #3 (Figure 68, 3-2).

Pour synthétiser ces résultats, la Figure 69 offre un panorama bien utile. Non seulement le nombre de mailles contenant une information diminue lors de la descente d'échelle (Figure 69, 4-1), mais il semblerait que le pourcentage de mailles contenant des taux de citations supérieurs à 75% augmente également. Notons cependant que les cartes du cadre d'étude #2 biaisent ce dernier point. En effet, le pourcentage de mailles dont les taux de citations étaient supérieurs à 75% a été légèrement plus bas que pour les cartes du cadre d'étude #1 :18% en moyenne pour ces dernières contre 11% pour les cartes du cadre d'étude #2. *A contrario*, ces dernières ont eu en moyenne 59% de mailles dont les taux de citations étaient compris entre 0 et 25% contre 43% pour les cartes du cadre d'étude #1.

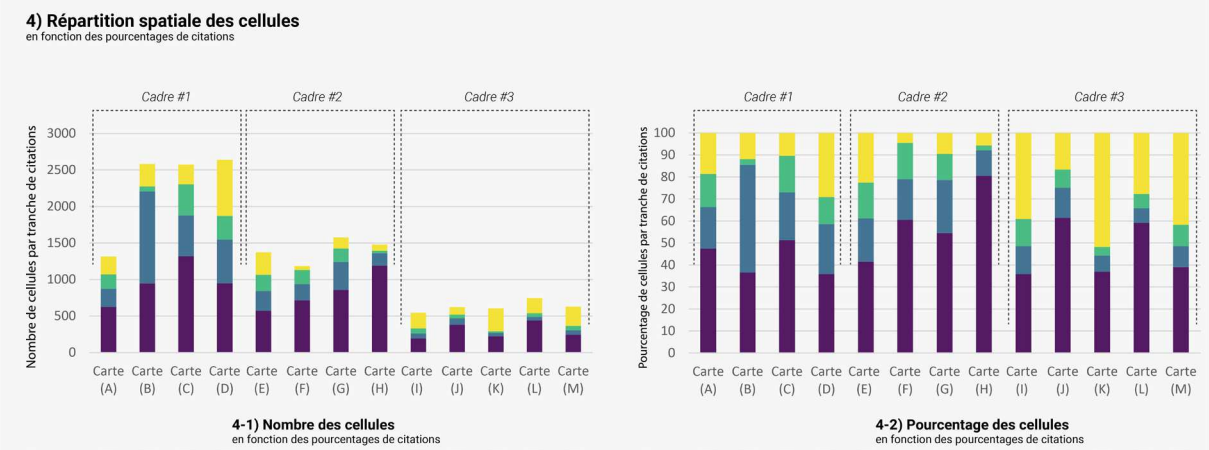


Figure 69 : Répartition statistique des mailles en fonction des pourcentages de citations (expérimentation #1)

Analyse collective des cartes :

À l'issue de cette première phase d'interprétation individuelle, les étudiants ont mobilisé l'ensemble des 13 cartes afin de fournir une analyse multi-sources des zones les plus touchées. Les vecteurs de sortie ont pu être exploités sur l'ensemble du cadre d'étude #1 et affichés en Figure 70. Le relevé des taux de citations a permis d'identifier trois secteurs dont les pourcentages étaient supérieurs à 75%. Ils étaient englobés dans une zone citée par 50 à 75% des étudiants. Quelques cas isolés, compris entre 25 et 50% des citations, ont désigné des secteurs situés à l'Ouest, au Nord et à l'Est.

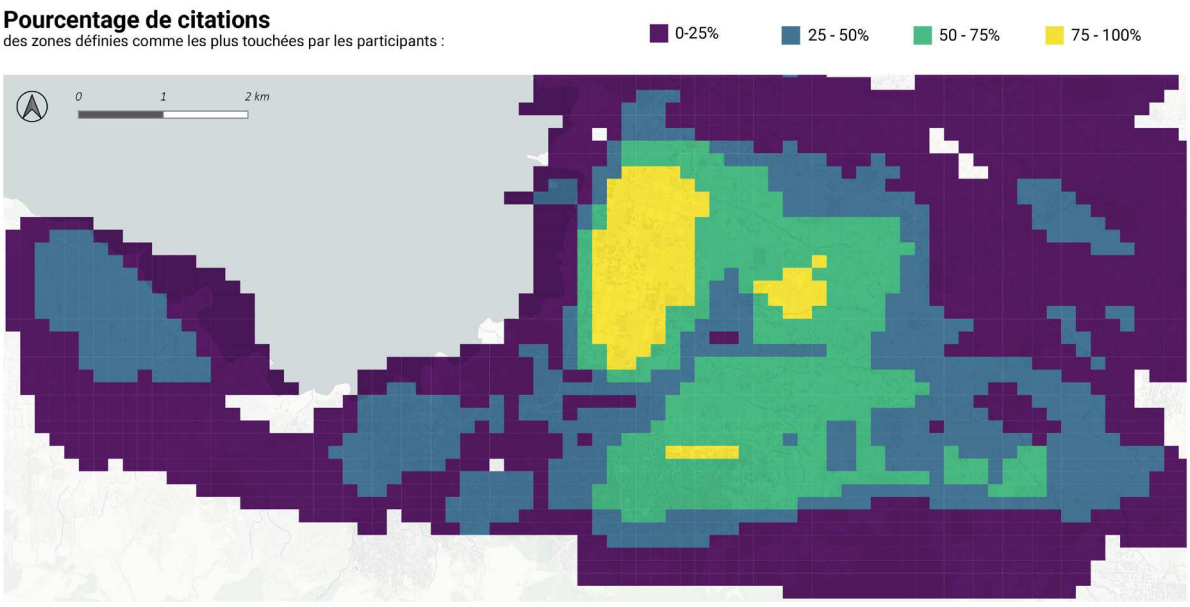


Figure 70 : Pourcentage de citations des zones définies comme les plus touchées après analyse collective des cartes par les participants (expérimentation #1)

Cette interprétation collective (Figure 70) a été comparée au cumul des interprétations individuelles du cadre d'étude #1 (Figure 67, 1-2). De manière respective, la première figure a été réalisée à partir de l'interprétation cumulée de chaque étudiant tandis que la seconde a intégré le cumul statistique des interprétations. Les deux figures ont démontré des résultats assez proches. Les cas isolés (25-50% de citations) et les fortes zones de convergences du centre de Port-au-Prince se sont montrés quasi identiques. Toutefois, le secteur au Sud a occupé moins d'espace pour la Figure 70. A contrario, l'analyse a fait ressortir un secteur à l'Est pour cette dernière.

Cette comparaison a permis de conforter l'idée selon laquelle pour obtenir des éléments de réponses concrets à communiquer, les étudiants qui ont mobilisé plusieurs cartes ont cherché à utiliser les données redondantes. Cela expliquerait en partie la proximité des résultats qui ont été observés entre la Figure 67, 1-2 et la Figure 70. Ce constat implique notamment que les modes de représentations ont joué un rôle important dans la façon dont les données ont été exploitées par l'ensemble des participants. Lorsqu'elles ont été confrontées, l'interprétation collective a privilégié certaines représentations afin de communiquer une information. Malgré des taux de citations supérieurs à 75%, le manque d'éléments de comparaison ou bien les choix cartographiques de certaines représentations n'ont pas permis pas de répondre à l'ensemble des questions que se posait le participant (quel niveau de dommages et combien de bâtiment sont concernés ?). Comme conséquence, il en ressort des zones de convergence où les étudiants ont été unanimes et des zones de divergences où la moitié des étudiants ont décidé de communiquer sur l'importance des dommages. La question qui se pose alors est de savoir si ces secteurs doivent être pris en compte ou non ? Pour compléter cette analyse, nous superposons ces résultats avec ceux des deux scientifiques du domaine des risques naturels et de la cartographie.

Convergence et divergence des résultats au regard d'une appréciation de scientifiques

Les zones vectorisées par les étudiants ont été analysées avec celles de scientifiques spécialisés dans la cartographie des risques et la cartographie d'impacts *post*-catastrophes du laboratoire (LAGAM). Cette étape a permis d'apprécier les niveaux de convergence et de divergence entre ces deux groupes et ainsi estimer le niveau de correspondance avec les résultats attendus pour les différentes cartes testées. Ils ont été synthétisés en Figure 71 par l'intermédiaire des pourcentages de mailles convergentes (bleues) et divergentes (oranges) qui ont été observés sur chacune des cartes expérimentées.

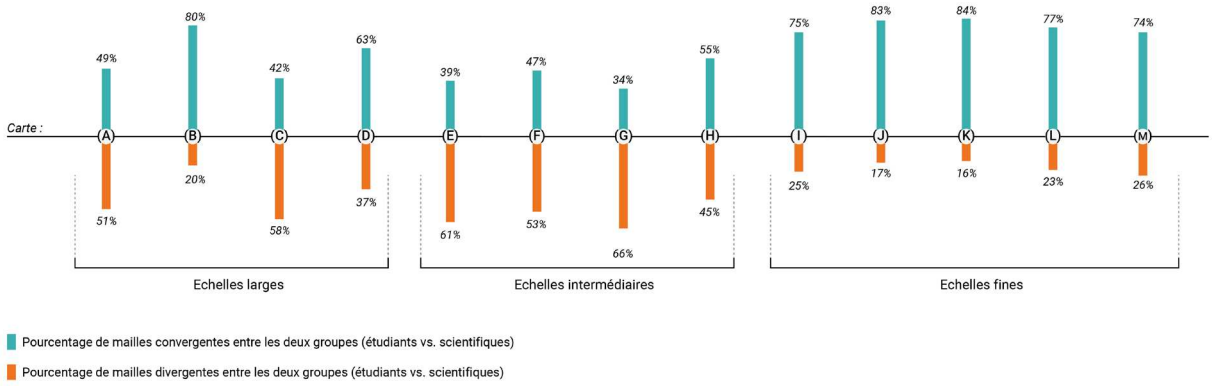


Figure 71 : Pourcentage de mailles convergentes et divergentes entre les deux groupes (étudiants vs scientifiques) pour chacune des cartes étudiées (expérimentation #1)

Les taux de convergence les plus élevés ont été identifiés auprès des cartes du cadre d'étude #3, correspondant aux échelles les plus fines. En moyenne, l'analyse des résultats obtenus des étudiants et des scientifiques a démontré une convergence dans 79% des cas contre 21% de divergence. Au sein du cadre d'étude #1, les résultats ont été plus mitigés avec une convergence moyenne de 58%. Pour la carte (**B**) par exemple, le taux de convergence entre les experts et les étudiants a été mesuré à 80%. Pour les cartes (**C**) et (**A**), ce taux de convergence a été mesuré en moyenne à 45%. La technique de points au bâti de la carte (**D**) a affiché un taux de convergence de 63%. Néanmoins, pour cette carte les résultats ont été biaisés par l'étendue de la zone de convergence des étudiants qui englobe une large partie de la carte de manière imprécise, augmentant de fait le taux de superposition avec les zones identifiées par les scientifiques. Pour finir, les cartes du cadre d'étude #2 ont obtenu les plus faibles résultats lors de cette comparaison. En moyenne, les taux de convergence et de divergence ont été mesurés à 43% et 56% respectivement. Les cartes (**E**) et (**G**) ont affiché des taux de convergence particulièrement bas (entre 34% et 39% de mailles). Les cartes (**F**) et (**H**) ont regroupé des taux de convergence respectifs de 47% et 55%. La comparaison de ces résultats avec ceux des représentations similaires a montré des écarts importants dans les taux de convergences obtenus. C'est notamment le cas des cartes (**B**), (**K**) et (**G**) qui affichaient les dommages sous la forme de blocs urbains. Les premières ont obtenu en moyenne 82% de mailles communes entre les scientifiques et les étudiants contre 34% pour la dernière.

À la vue générale de ces résultats, nous en déduisons que la descente d'échelle a permis d'améliorer l'efficacité générale des techniques qui ont été utilisées pour représenter les dommages. Ils ont également mis en avant que pour une même technique déployée, l'exactitude de l'interprétation des étudiants pouvait être différente. Une représentation explicite et constante garantit la régularité des interprétations lors de la montée ou la descente d'échelle.

6.2.3. Estimation des niveaux de certitude des participants et de lisibilité des cartes

Analyse individuelle des cartes :

Les niveaux de certitude (N.C) et de lisibilité (N.L) ont apporté des éléments de comparaison entre les cartes (Figure 72). Qui plus est, certaines techniques d'agrégation étaient similaires à chacun des seuils de zoom permis par les cadres d'étude. Nous avons pu ainsi comparer ces deux critères entre les techniques et les différentes échelles cartographiques, mais également aux résultats obtenus lors des tâches d'analyse. Ces derniers concernaient le pourcentage de convergences de la vectorisation des zones les plus touchées par les étudiants (Cv.et), du pourcentage de convergences et de divergences entre les zones vectorisées par les étudiants et les experts (Cv.ex) et du taux d'erreurs pour les tâches *T3* d'estimation qualitative et quantitative (Err.T3).

De manière générale, les cartes du cadre d'étude #3 ont obtenu les meilleurs taux de certitude. Ils représentaient respectivement en moyenne 61% et 66% des réponses. Parmi les cartes du cadre d'étude #1, 50% des participants en moyenne ont estimé qu'ils étaient « sûrs ou tout à fait sûrs » de leur estimation, contre 28% pour les cartes du cadre d'étude #2. Il en va de même pour le niveau de lecture des cartes, considéré comme meilleure pour le premier groupe. Cela implique donc une plus grande confiance et une meilleure lisibilité perçues des cartes du cadre #1 vis-à-vis des cartes du second cadre.

De toutes les techniques, ce sont les centroïdes de blocs urbains qui ont affiché les scores les plus bas. Les participants n'ont pas été « pas sûrs à pas sûrs du tout » dans 67% des cas et ont considéré à 81% que la technique n'était « pas facile à pas du tout facile à lire ». Cette dernière a pourtant bénéficié de la meilleure corrélation entre les zones citées à plus de 75% par les étudiants et les scientifiques. Néanmoins elle a montré un taux important (79%) d'erreurs d'estimation à la tâche T3. L'implantation ponctuelle au bâti a également été moins bien notée que les autres techniques. La perception du niveau de certitude ne s'est améliorée qu'avec la descente d'échelle cartographique. Pourtant la comparaison des résultats a montré des pourcentages de convergences plus importants pour la carte (**D**) vis-à-vis de (**E**). Ce constat témoigne du manque de précision générale de la carte (**D**) et des zones vectorisées trop vastes qui en ressortent. L'amélioration du niveau de certitude a été observée uniquement en comparaison de la carte (M). 57% des étudiants ont estimé être « sûr à tout fait sûr » contre 23% pour la carte (**D**). Pourtant, elle a montré un taux d'erreur proche de 60% pour T3. À noter que le niveau de lecture et la certitude des participants vis-à-vis de cette technique n'ont été améliorés qu'aux échelles les plus fines.

Les aires/surfaces de bâtiments endommagés ont présenté des niveaux de lecture et de certitude relativement similaires. Environ 50% des participants ont considéré que la carte (**F**) était « facile » à lire et qu'ils étaient « sûrs » *a minima* de leur estimation. Les résultats du questionnaire ont montré qu'environ 50% des participants ont donné une mauvaise interprétation de la donnée et ont vectorisé des secteurs divergents à ceux des experts. Concernant le carroyage, le niveau de certitude ne s'est pas amélioré lors du passage aux grandes échelles. En effet, plus de 50% des étudiants ont considéré que leurs réponses aux cartes (**C**) et (**L**) étaient inférieures ou égales à la classe « ni sûr, ni pas sûr ». *A contrario*, la facilité de lecture a évolué positivement entre ces deux cartes, tout comme le pourcentage de convergence entre les étudiants et les experts.

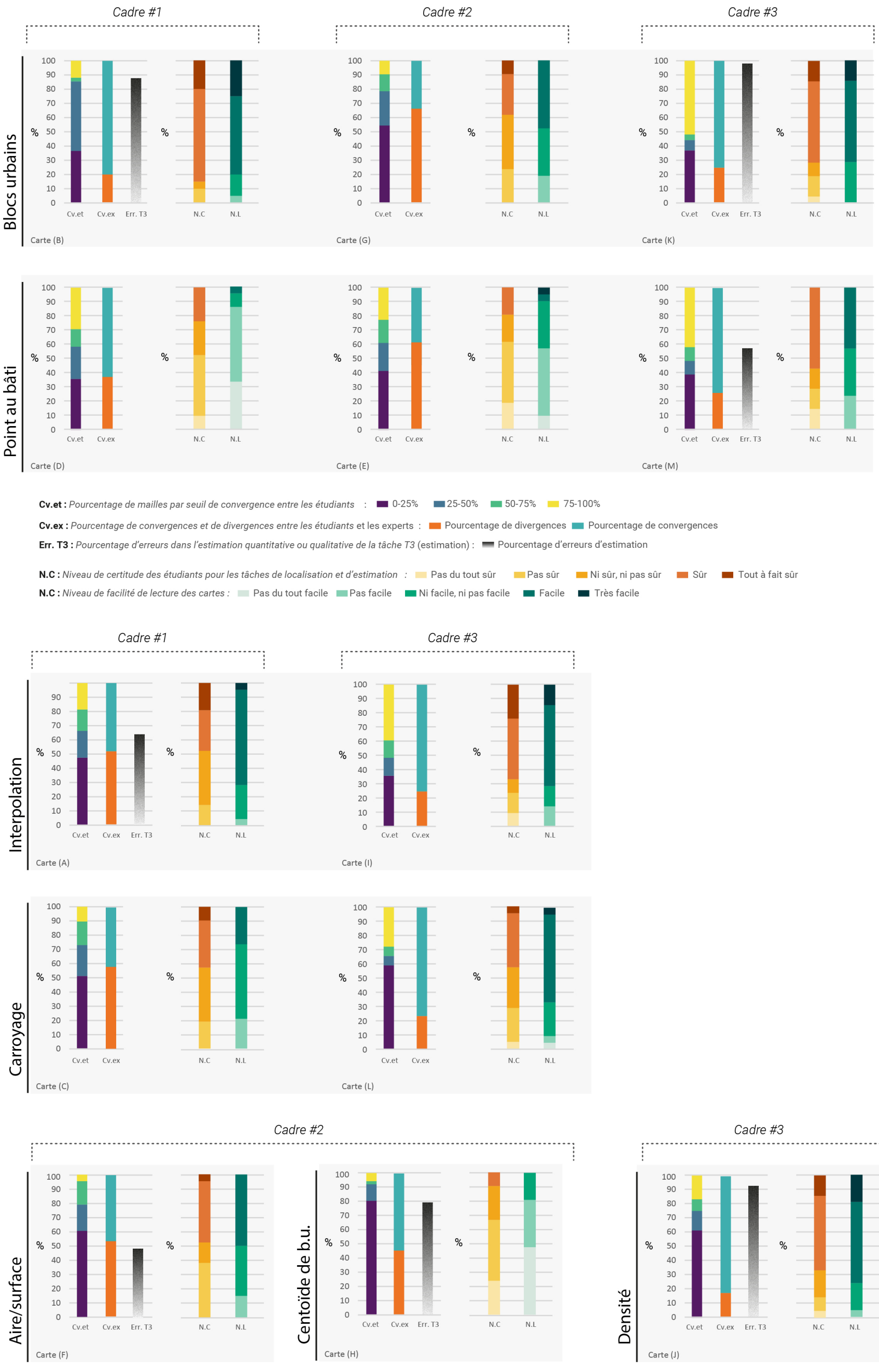


Figure 72 : Comparaison entre les niveaux de certitude (N.C) et de lisibilité (N.L) estimés avec les résultats obtenus pour les tâches d'analyse et de vectorisation des cinq techniques testées (expérimentation #1

L'interpolation et les blocs urbains ont bénéficié des meilleures notes concernant la lisibilité de la donnée aux échelles « très larges » (cadre #1). Lors de la descente d'échelle, nous avons pu remarquer néanmoins que seule l'interpolation a bénéficié d'une amélioration de la lisibilité. Les résultats se sont montrés différents concernant le niveau de certitude pour lequel les blocs urbains ont affiché de meilleurs résultats. 85% des participants ont estimé qu'ils étaient « sûrs » (65%), voire « tout à fait sûrs » (20%) des réponses qu'ils avaient fournies pour la carte (**B**). *A contrario*, ce niveau de certitude est estimé à 47% pour l'interpolation. Ces résultats ont semblé en adéquation avec les erreurs d'estimation et le plus faible taux de convergence entre les étudiants et les experts pour la carte (**A**). Toutefois ce niveau a eu tendance à s'améliorer avec la descente d'échelle. Les niveaux « sûr à tout à fait sûr » ont été mesuré à 67% à la carte (**I**) (échelle fine). Inversement, cette certitude a tendu à se réduire pour les blocs urbains. 38% des étudiants ont été « sûrs à tout à fait sûrs » de leur estimation pour la carte (**G**). Malgré ces changements perceptibles entre les échelles, ces deux techniques sont restées relativement très bien notées par les participants. Les niveaux de certitudes ont été importants vis-à-vis des taux d'erreurs d'estimation à la tâche *T3*. C'est également le cas pour la carte de densité qui a obtenu de très bonnes notes tant pour la certitude des étudiants que pour la lisibilité.

Ces observations ont démontré que le niveau de certitude des utilisateurs pouvait être influencé par la lisibilité et la facilité avec laquelle ils ont pu identifier et vectoriser des zones bien distinctes. Globalement, les erreurs d'estimation quantitative ou qualitative de la tâche *T3* n'ont pas semblé être perçues par les participants, hormis potentiellement pour les cartes (**A**) et (**F**).

Analyse collective des cartes :

L'estimation du niveau de certitude a également été demandée lors de la phase d'analyse collective. Les résultats ont montré qu'une fois l'ensemble des cartes en main, les étudiants ont fourni des réponses dont ils étaient « sûrs » à 62% et « tout à fait sûrs » à 5% des cas. 28% n'ont été « ni sûrs, ni pas sûrs » et 5% « pas sûrs ». Pour les étudiants « sûrs » et « tout à fait sûrs » de leur réponse, 50% d'entre eux ont indiqué que « l'ensemble des cartes représentent plus ou moins les mêmes choses », que « la corrélation et le regroupement d'information permettent de faire ressortir des zones identiques », « ceci malgré des degrés de précision différents entre les cartes ». Finalement les cartes « les plus lisibles montrent toutes ces zones, quelles que soient les échelles de représentation ». Pour les étudiants « pas sûrs » ou qui ne sont « ni sûrs, ni pas sûr », 60% ont considéré que « selon les cartes, les zones les plus touchées n'étaient pas les mêmes » *et* « *q*ue même si le centre-ville est la zone la plus touchée, en fonction du mode de représentation d'autres quartiers ont pu être relevés ». *À* la vue des 13 cartes « il est difficile de faire émerger toutes les zones, ou au moins les zones principales ».

Ces éléments d'appréciation permettent de déterminer l'incertitude liée à la localisation et à la confrontation de plusieurs jeux de données. À la vue de ces réponses, il parait clair que les étudiants qui étaient « sûrs » et « tout à fait sûrs » d'avoir localisé les zones les plus touchées ont privilégié la redondance des informations contenues dans les 13 cartes. Ils ont eu tendance à exclure les zones qu'ils ne pouvaient pas comparer. Pourtant, seules les cartes regroupées dans le cadre d'étude #3, correspondant au seuil de zoom maximum, ont offert des degrés de certitude élevés et constants (Figure 72,1). *A contrario*, les estimations ont été plus partagées pour les échelles intermédiaires à très larges.

Malgré la redondance des informations entre les cartes, certaines représentations cartographiques ont été plus difficiles à lire. Elles ont fourni des réponses incomplètes (taux de réponse hors sujets) et ont donné lieu à une plus grande divergence d'interprétation.

6.2.4. Classification des cartes par ordre d'efficacité visuelle

À la fin de l'exercice, les étudiants disposaient d'un temps imparti pour classer les cartes selon l'efficacité visuelle des représentations cartographiques expérimentées. Cette efficacité a été définie à partir de l'appréciation des choix sémiologiques et techniques des cartes et de leur capacité à fournir des éléments de réponses efficaces pour la réalisation des tâches. Cette classification a été réalisée de la manière suivante : les cartes ont été ordonnées de 1 à 13, 1 étant considéré comme la carte la plus efficace et 13 la moins efficace. Afin de simplifier l'analyse, ces résultats ont été affichés sous la forme d'un diagramme de flux (Figure 73). La partie de gauche illustre les flux entre les cartes et leur positionnement dans le classement. La dimension de ces flux, exprimée en pourcentage, est proportionnelle au nombre de fois qu'une carte occupe une position dans le classement. La partie de droite regroupe les résultats en fonction des 7 grands types de représentations cartographiques que l'on retrouve dans les 13 cartes. Notons tout de même que la forte dispersion des citations a impliqué des pourcentages relativement bas pour chacun des flux. Ces diagrammes offrent donc plusieurs degrés de lecture.

- Individuellement, nous pouvons analyser le positionnement et le poids de chaque carte dans la classification. Par exemple, la carte (**A**) est arrivée globalement en tête du classement. Cela a également été le cas de la carte (**B**) qui a occupé la première position pour 19% des participants. Ces cartes ont été les seules du cadre d'étude #1 (échelles larges) à obtenir ce niveau d'appréciation des participants. Les cartes (**D**) et (**C**) ont été plus largement citées respectivement en 12e et 8e position. Les cartes du cadre d'étude #2 (échelles intermédiaires) ont été généralement placées en 4e (**G**), 9e (**F**), 11e (**E**) et 13e position (**H**). Les cartes réalisées aux échelles les plus fines (cadre d'étude #1) sont caractérisées par une distribution plus éclatée. Toutefois, la carte (**I**) est arrivée majoritairement en 2e position.
- Lorsqu'elles sont regroupées par type de représentation, les flux démontrent que les techniques qui agrégeaient la donnée par l'intermédiaire d'une implantation ponctuelle (Point bâti) et du centroïde de blocs urbains ont été cités en 12e et 13e position dans 20 à 54% des cas. L'interpolation a été citée principalement en première et seconde position, tandis que les blocs urbains ont été principalement cités entre la 1ère et 5e position. Les cartes (**C**) et (**L**) qui utilisaient le carroyage ont majoritairement été cités en 10e position (27%) même si 36% des participants leur ont attribué la 3e et 4e position.

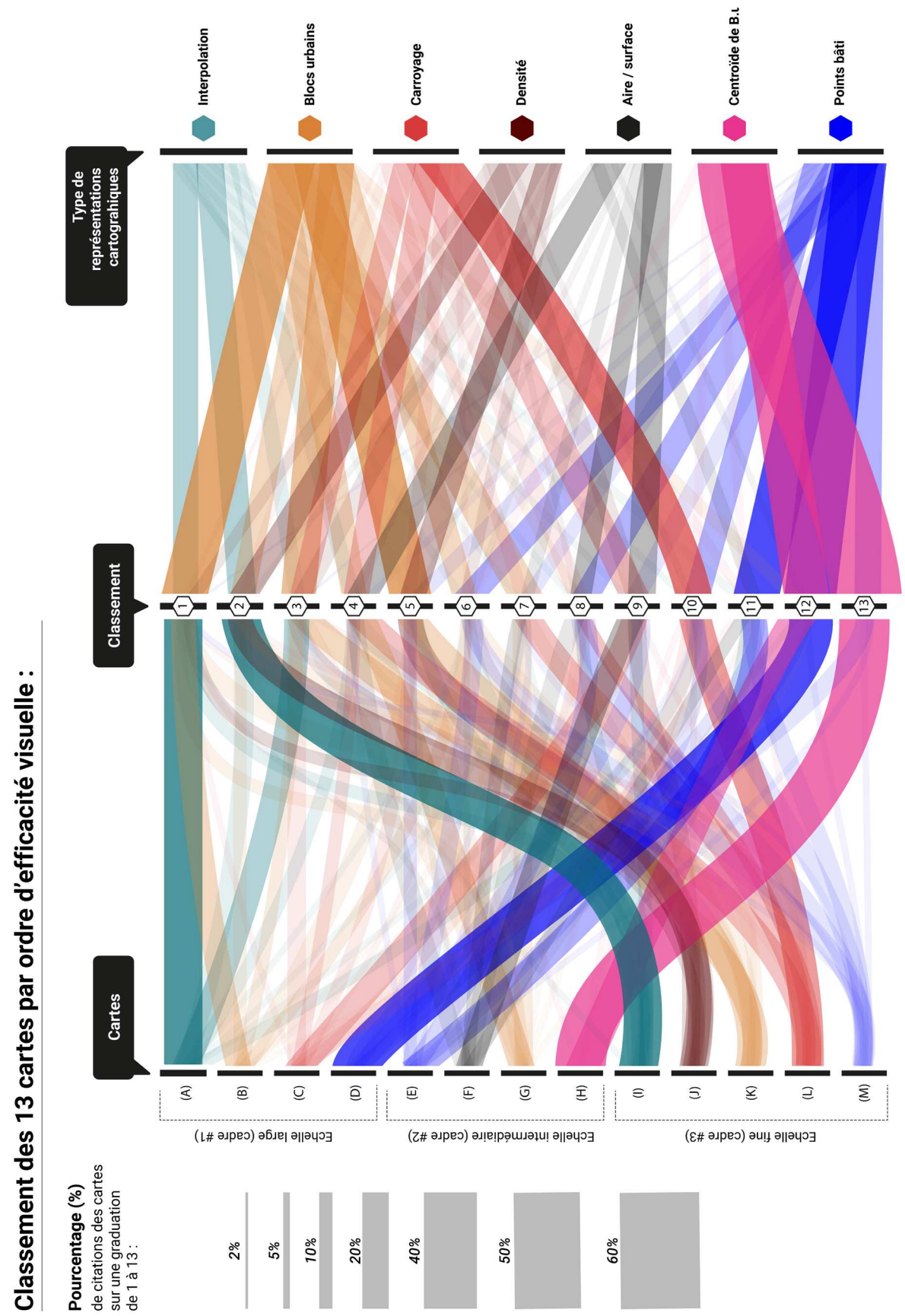


Figure 73 : Classification des cartes par ordre d'efficacité visuelle (de 1à 13) et répartition des taux de citations par type de représentations cartographiques (expérimentation #1)

6.3. Synthèse de l'expérimentation #1

Au début de cette expérimentation, plusieurs hypothèses avaient été émises. La première cherchait à connaitre la capacité des cartes à communiquer une information et à la transmettre de manière identique, notamment lorsqu'une même tâche était effectuée sur un même support. L'homogénéité des participants soumis à l'expérimentation devait fournir des réponses relativement similaires (**H1**). Néanmoins nous avons constaté une grande diversité des réponses obtenues pour chacune des cartes, notamment les cartes (**F**), (**E**), (**G**). Les secteurs ont été nommés en utilisant la quantité importante de toponymes présente sur ces figures. D'autre part, et ceci malgré un niveau de détail plus élevé dans ces réponses, nous avons constaté que les niveaux de convergence d'interprétation entre les étudiants ont été en moyenne plus bas que pour les autres cartes. De plus, la comparaison avec l'analyse des scientifiques a démontré que les cartes (**E**) et (**G**) ont également obtenus les moins bons taux de correspondances (39% et 34% respectivement). Cette hypothèse est donc invalidée.

Dans un contexte où le temps est limité et conformément aux avantages de l'agrégation statistique, les cartes qui cherchent à simplifier l'information aux échelles intermédiaires à très larges devraient obtenir de meilleurs résultats pour la localisation des secteurs les plus touchés. De fait, elle devrait également bénéficier d'une meilleure lisibilité de la part des participants (**H2**). Cette hypothèse est partiellement validée. En effet, les résultats de l'expérimentation ont démontré que les niveaux de convergence entre les étudiants et leur comparaison avec les experts variaient en fonction des modes de représentation. Les blocs urbains ont obtenu de bons résultats *a contrario* du carroyage. Néanmoins, les niveaux de lecture perçus par les étudiants ont été en adéquation avec ces résultats.

La troisième hypothèse (**H3**) suggérait que l'utilisation de variable visuelle de couleurs relativement proches entre les différentes techniques et le type d'informations transcrites pourrait entraîner des conséquences sur l'interprétation des utilisateurs. Cette hypothèse est validée comme en témoigne le taux important de réponses hors sujet fournies pour certaines représentations. 7 cartes sur 13 ont donné lieu à des interprétations erronées de la donnée affichée. Pour trois d'entre elles (**A, F** et **G**), les étudiants ont répondu à une tâche quantitative sans disposer de cette information. De la même manière, les participants ont communiqué une information qualitative pour les cartes (**B**), (**J**), (**K**) et (**M**) en se basant sur des données exclusivement quantitatives. De manière générale cette problématique semble avoir eu peu d'incidence sur le niveau de certitude des étudiants hormis pour les cartes (**A**), (**F**) et plus fortement (**H**). Le quota de mauvaises réponses n'a pas semblé influencer la certitude des participants pour les cartes strictement quantitatives (**B, J, K, M**).

Une quatrième hypothèse (**H4**) proposait que lors de l'analyse collective des cartes, les étudiants privilégieraient les cartes pour lesquelles les données perçues et interprétées étaient redondantes afin d'identifier les secteurs les plus touchés par la catastrophe. Cette hypothèse est partiellement validée. En effet, les taux de convergence obtenus lors de la vectorisation de cette tâche ont montré leur relative proximité avec le cumul statistique des taux de convergence calculés des cartes du premier secteur. La majorité des étudiants ont semble-t-il privilégié les cartes pour lesquelles ils pouvaient comparer et valider les données d'endommagement.

Cependant, il est également ressorti des zones de divergences pour lesquelles la moitié des étudiants ont décidé de mobiliser d'autres cartes. Cela suppose donc des zones d'incertitudes lors de la phase de visualisation et d'interprétation pour l'ensemble des utilisateurs.

Enfin, malgré un taux de certitude modéré et d'importantes erreurs d'interprétation, les étudiants ont noté comme plus efficaces les représentations qui sont visuellement plus saillantes. La simplification des données géographiques est donc plus efficace lorsqu'elle garantit une bonne lisibilité des données.

En conclusion, la convergence des résultats de cette expérimentation a permis de dresser un premier constat sur les capacités d'interprétation et de communication de l'échantillon cartographique expérimenté. Il existe des divergences d'interprétation lors qu'un groupe d'utilisateurs homogène analyse une même technique cartographique sur un même espace. Des divergences d'interprétations sont apparues aussi lorsque les résultats de plusieurs techniques étaient superposés et comparés, malgré une donnée d'entrée identique, et que nous avons retrouvée également lorsque les interprétations les plus unanimes des étudiants étaient confrontées au regard des scientifiques. Simplifier l'information par les méthodes d'agrégation tel que les blocs urbains ou l'interpolation permettent de gagner en lisibilité. Cela se traduit par un plus grand niveau de certitude et une plus grande efficacité perçue de ces cartes. Cependant, il est intéressant de constater que ces choix techniques et sémiologiques ont des conséquences sur la visualisation et l'interprétation du message cartographique, notamment lorsque les techniques sont mono-informationnelles (quantitative ou qualitative). La convergence et la divergence des interprétations sont donc imputables aux types d'information, quantitative ou qualitative, que transmettent ces cartes aux petites échelles.

Conclusion intermédiaire

Cette première expérimentation apporte plusieurs éléments de réponses aux problématiques soulevées par la diversité des cartes de dommages *post*-catastrophes. Par l'intermédiaire de l'analyse du style cartographique, nous avons pu démontrer l'existence de pratiques communes favorables à leur reconnaissance visuelle. Nous avons également démontré que les divergences observées au sein de la production cartographique qui fait suite au séisme de Haïti (2010) ne représentent pas un cas isolé. En effet, l'analyse montre que les cartes échantillonnées affichent des représentations cartographiques différentes en fonction des échelles d'appréciation (1 : 5 000e jusqu'au 1 : 500 000e). Elle a révélé notamment que les cartes produites aux petites échelles (inférieures au 1 :25 000) étaient proportionnellement moins nombreuses et plus variées. A contrario, les cartes réalisées aux grandes échelles sont caractérisées par une forte utilisation des points au bâti pour représenter les dommages. Ces convergences ou divergences des pratiques cartographiques sont observées dans la représentation des dommages, mais aussi pour les données de second plan et les fonds de carte utilisés. Notons tout de même que les productions réalisées à l'initiative de Copernicus EMS sont caractérisées par un haut niveau de standardisation. Les dommages, les réseaux routiers, les points d'intérêts à la gestion de crise sont apparus majoritairement identiques à quelques variables près. Ces cartes sont donc plus sujettes à une reconnaissance de ces signes graphiques malgré la diversité des agences qui ont opéré dans leur conception. La CHARTE a présenté une plus grande diversité marquant ainsi le manque de consensus

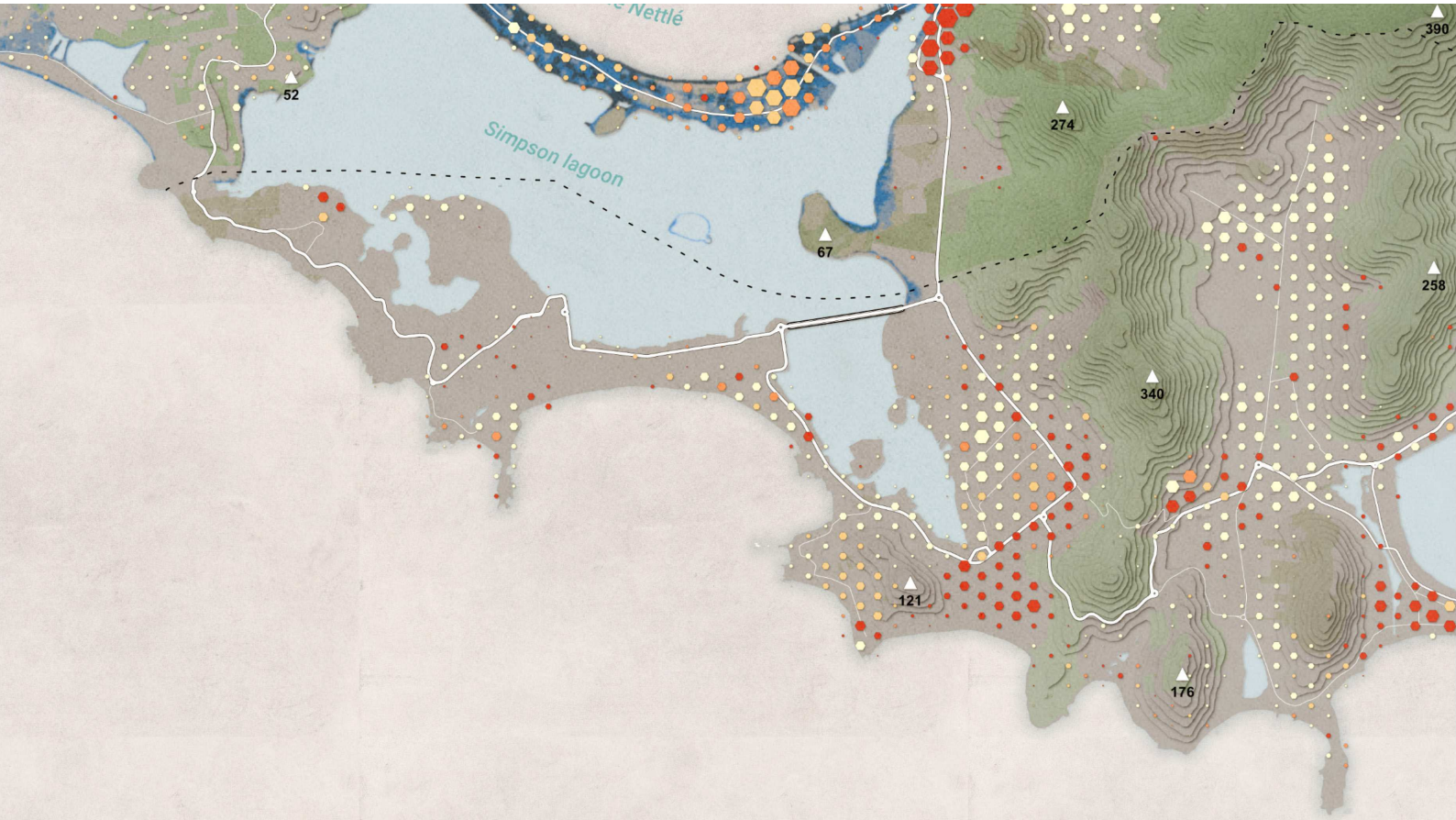
international existant entre les producteurs de données. Autre particularité, les images satellitaires sont utilisées comme fond de carte pour la grande majorité des cas, quelle que soit l'échelle cartographiée. Cependant, ce qui fait le principal avantage de ces images dérivées à l'instant T peut également en être le principal défaut, à savoir qu'il est impossible d'en contrôler la qualité visuelle. Dès lors, de nombreux paramètres peuvent provoquer une surcharge visuelle de l'image et nuire à la lisibilité de la carte comme cela a été le cas des masses nuageuses stagnantes à la suite du cyclone Irma à Saint-Martin (2017).

Ainsi, malgré l'existence de pratiques communes, la variation des styles cartographiques que nous retrouvons aux échelles synoptiques peuvent rendre difficiles les choix opérés par l'utilisateur et les décisionnaires. Dans un contexte de gestion de crise et de *post*-crise, choisir la carte la plus efficace, présentant les meilleures données, comme outil décisionnel, représente alors un « challenge » (***Kerle, 2013***). L'expérimentation #1, reprenant le cas du séisme de Haïti en 2010, nous en a appris un peu plus sur les problématiques d'interprétation liées à ce type de représentation. Nous avons pu observer les différences de perception et d'interprétation individuelle et collective des participants. Mais également, les erreurs de lecture quantitative et qualitative des données qui découlaient d'une mauvaise compréhension du message cartographique. En outre, cette expérimentation nous a appris aussi que les seuils de convergences et l'exactitude des réponses s'amélioraient lors de la descente d'échelle, qu'importe la tâche à accomplir et le mode de représentation. Ce constat, en lien avec l'analyse précédente concernant les styles cartographiques, a mis en évidence l'importance des échelles de visualisation. Les techniques de points au bâti seront mieux perçues aux grandes échelles qu'aux petites échelles. **Comme le suggère l'état de l'art, l'utilisation de l'implantation ponctuelle doit se cantonner à des échelles suffisamment fines pour éviter de complexifier l'image cartographique. Regrouper l'information aux plus petites échelles permet d'améliorer visuellement la lecture des cartes du point de vue du lecteur.** Cependant, il faut faire attention, car ce dernier aura tendance à être influencé par le « message esthétique » de la carte (***Rimbert, 1973***), quitte à introduire des interprétations hors sujettes. C'est notamment le cas de certaines techniques comme les blocs urbains.

La question qui se pose désormais est la suivante : comment proposer une méthode d'agrégation statistique pour les échelles larges et intermédiaires qui serait efficace, à la fois sur le plan visuel et cognitif, pour l'estimation de données qualitatives et quantitatives ?



PARTIE 3 : PROPOSITION D'UNE REPRESENTATION CARTOGRAPHIQUE POUR L'OPTIMISATION DE L'ANALYSE DES DOMMAGES AUX PETITES ÉCHELLES



Saint-Martin, Petites Antilles Française

Partie 3 : Proposition d'une représentation cartographique pour l'optimisation de l'analyse des dommages aux petites échelles

L'état de l'art entrepris sur la cartographie nous a appris que toute image graphique intègre des notions techniques (méthode de calcul, choix des données, etc.) et des notions sémiologiques lui permettant de visualiser une information et d'en assurer une bonne transmission. L'analyse des cartes de dommages a démontré la richesse et la diversité des méthodes qui sont employées pour traiter et cartographier l'impact d'une catastrophe. À l'échelle de la durée vie de ces cartes, la pléthore des modes de représentation ne permet pas de consensus international. Les nombreux paramètres comme le type d'aléa, la capacité d'exploitation de la donnée satellitaire, les producteurs et le type d'utilisateurs ciblé influencent notamment cette diversité. Les résultats de l'expérimentation #1 ont mis en avant la nécessité de développer une méthode de visualisation favorable à la lecture qualitative et quantitative des dommages facilement interprétable dans un contexte de crise. Pour cela, il existe des solutions qui entremêlent des aspects sémiologiques et techniques afin d'aboutir à des représentations graphiques conformes aux enseignements de la cartographie. Dans cette section, nous proposons une méthode de représentation cartographique qui se fonde sur les règles de sémiologie graphique et un développement sous SIG (Figure 74). S'en suit une phase d'expérimentations visant à tester l'efficacité estimée de notre représentation cartographique vis-à-vis de techniques préexistantes. Par efficacité, nous parlons de la capacité visuelle et cognitive des cartes à faciliter l'interprétation et l'assimilation d'une information par les utilisateurs. Pour cela plusieurs méthodes ont été développées. En partant des méthodes développés pour l'expérimentation #1 et pour la cartographie des ressentis (***Arnaud, 2020***), nous avons proposé une seconde expérimentation (expérimentation #2) consistant à évaluer la convergence des informations mémorisées pour différents modes de représentation vis-à-vis d'un groupe de participants variés. Cette expérimentation a été organisée lors d'un atelier expérimental programmé dans le cadre du colloque Géorisques 2020, en collaboration avec le CNES, le SERTIT et le SIRS. Une troisième expérimentation a consisté à analyser les stratégies de lecture d'une carte à partir des mouvements oculaires (expérimentation #3). Il s'agissait de tester les capacités visuelles de notre technique vis-à-vis de trois autres méthodes d'agrégation des dommages. Cette troisième expérimentation a été réalisée à partir de la technologie de suivi oculométrique (Eye-tracking) sur un panel de participants homogènes grâce à la collaboration du Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier (LIRMM). Ainsi, ces deux expérimentations avaient pour objectifs d'approfondir (**1**) les expérimentations menées sur les méthodes existantes et (**2**) de mesurer la capacité cognitive, perceptive et *in fine* d'appréciation de notre représentation cartographique.

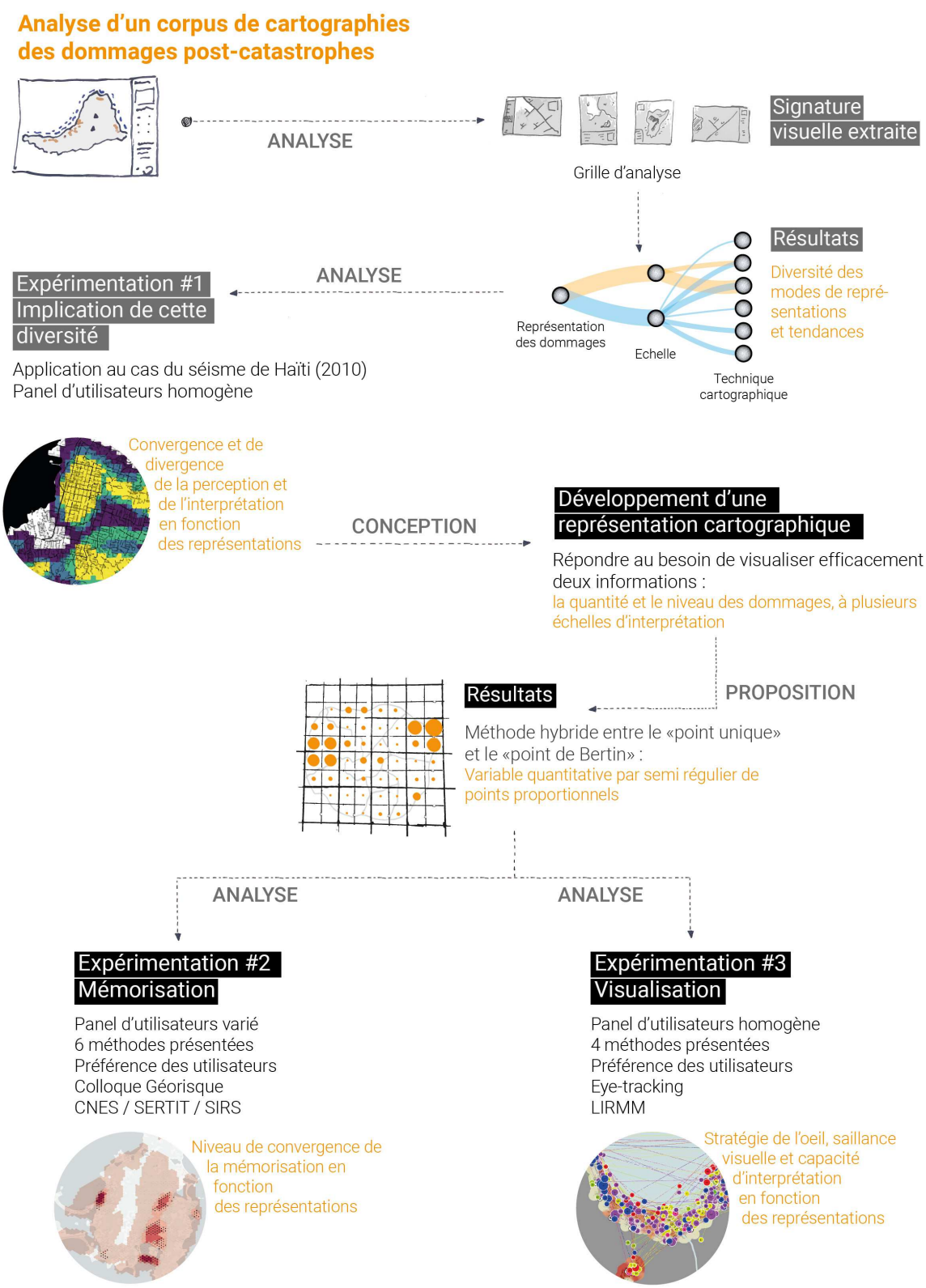


Figure 74 : Seconde phase de la démarche méthodologique

Chapitre 7 : Faciliter l'analyse spatiale de données thématiques par les méthodes d'agrégation statistiques

7.1. Le quadrillage géométrique comme support d'analyse spatiale, intérêts et contraintes

7.1.1. Avantages d'un quadrillage géométrique dans la visualisation des données à différentes échelles

L'analyse spatiale est une notion dont la définition varie en fonction des disciplines (aménagement du territoire, gestion de l'environnement, étude d'impacts, etc.) ou des courants de la géographie. D'un point de vue sémantique, cette notion intègre deux concepts : l'espace, qui renvoie à l'espace géographique, et l'analyse qui, en fonction des disciplines, peut prendre plusieurs formes (***Caloz & Collet, 2011***). Du point de vue cartographique, l'analyse spatiale de données thématiques peut revenir à « formaliser la configuration et des propriétés de l'espace produit et vécu par les sociétés humaines » (***Pumain et al., 2001***). Autrement dit, il s'agit du traitement d'un ou plusieurs ensembles de données sur un espace géographique permettant de dégager la répartition et l'organisation d'un phénomène ciblé. Cette représentation spatiale conduit à un second cycle de vie de l'analyse spatiale qui consiste à un traitement de l'information « traduisant, sous une forme facile à lire et à retenir, les correspondances et les relations qui peuvent exister entre-elles, faire ressortir les idées de différences, d'équivalence ou d'ordre » (***Zanin, 2006a***). L'analyse spatiale aboutit à des représentations simplifiées des objets géographiques (***Pumain & Saint-Julien, 2010***) permettant d'en représenter les modèles de fonctionnement et les processus spatiaux. Cette perspective oriente notre réflexion sur les paramètres de la simplification d'une information géographique en lien avec le concept d'échelle cartographique. Ces paramètres contraignent le nombre d'informations à représenter afin d'assurer la lisibilité de l'image graphique (***Béguin & Pumain, 1994***). Ce faisant, les cartes à grandes échelles doivent assurer un affichage précis de l'information au bâtiment tandis que les cartes à petites échelles doivent favoriser une vision des dynamiques spatiales du thème abordé, et qui dans notre cas se réfèrent aux dommages *post*-catastrophes.

L'expérimentation précédente (expérimentation #1) nous a appris que certaines représentations, cherchant à simplifier la donnée par différentes méthodes d'agrégation (interpolation, blocs urbains, carroyage, etc.), peuvent être moins bien perçues par certains utilisateurs. C'est notamment le cas du carroyage carré utilisé aux petites échelles. Les choix sémiologiques moins efficaces ont réduit la lisibilité, malgré des informations quantitatives et qualitatives essentielles censées aux tâches demandées (cf. supra 6.2 : expérimentation #1). Pourtant d'un point de vue analytique, l'utilisation du carroyage présente une série d'avantages notables par rapport à d'autres types de quadrillages tels que le maillage administratif (***Mangiavillano, 2008***) ou encore, celui créé à partir du découpage avec le réseau routier (blocs urbains). À partir des résultats de l'expérimentation #1, notre proposition sémiologique explore plus avant les possibilités de cette technique.

L'intérêt de cette technique est tout d'abord méthodologique, notamment si nous considérons le fait que des utilisateurs non spécialistes se retrouvent à effectuer des tâches d'identification des secteurs les plus

durement touchés lors d'une gestion de crise. En effet, le carroyage est la forme la plus simple et la plus ancienne d'analyse spatiale quantitative (***Zaninetti, 2005***). Appelé méthode des « quadrats » en statistique spatiale, ou encore « de tessellation », le carroyage est tout d'abord né de l'écologie quantitative. Il est par la suite adopté par l'archéologie puis par la géographie (***Zaninetti, 2005***). Il s'agit d'un découpage neutre et arbitraire de l'espace géographique (***Lambert & Zanin, 2016***) en un maillage orthonormé dont la forme (carré, triangle, hexagone, etc.) et la dimension des mailles peuvent varier en fonction des objectifs (***Barbarino, 2005***). En cela, le carroyage est une technique suffisamment courante pour être connue par une majorité d'utilisateurs.

Lajoie (***1995***) souligne que cette technique permet également de « répondre aux difficultés comme l'absence d'harmonisation des données, ou celles de la comparaison entre des informations provenant de sources différentes et à des échelles différentes ». De plus, la création d'un carroyage régulier permet le décompte d'entités géographiques et la création d'indicateurs spatio-temporels d'une résolution spatiale identique (***Lambert & Zanin, 2016***). Cette régularité donne une distribution uniforme de l'information géographique traitée, ce qui facilite la comparaison entre plusieurs entités spatiales (***Mangiavillano, 2008***), même à plusieurs échelles de visualisation. La donnée brute de l'endommagement en représente une bonne illustration, développée ci-après.

Dans le cas d'un comptage par mailles administratives, la comparaison des dommages sera contrainte par l'irrégularité des superficies (communales par exemple). Le traitement quantitatif, visualisé par des ratios ici, sera borné aux limites des territoires analysés (Figure 75). De la même manière, le découpage irrégulier créé à partir d'un réseau routier reporte ce problème à une autre échelle. L'affichage complémentaire des objets (bâtiments endommagés) utilisés pour l'analyse quantitative sera donc nécessaire afin de commenter la répartition des résultats obtenus par ces deux formes de maillage. En comparaison, un carroyage régulier offre une finesse d'interprétation en s'affranchissant des irrégularités administratives des territoires et structurelles du réseau routier. Il permet de cibler les secteurs qui ont les rapports quantitatifs les plus élevés tout en permettant la comparaison.

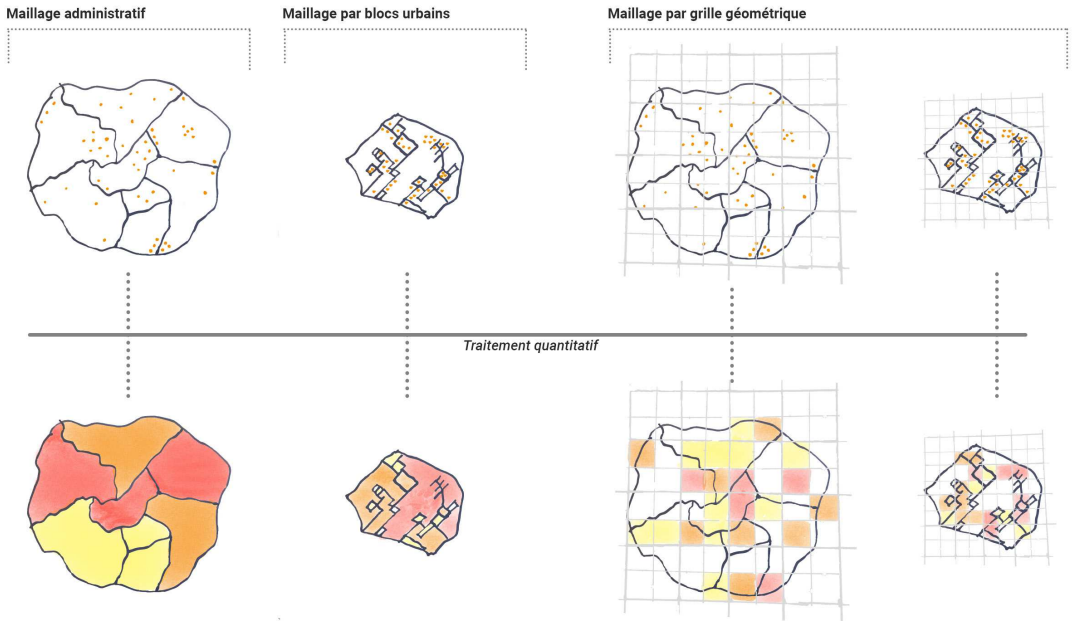


Figure 75 : Comparaison des résultats quantitatifs obtenus selon un maillage administratif, par blocs urbains et un carroyage régulier

Le carroyage régulier est d'autant plus utile qu'il n'est pas contraint par les échelles de visualisation. Même si cette méthode lisse la donnée, le choix de la dimension des mailles permet d'éviter les biais induits par la discrétisation de l'information sur des surfaces trop grandes. Pour ces dernières, il existe une perte de représentativité de la réalité de terrain dans le cas où la disparité spatiale des données n'est pas influencée par des logiques administratives. Pour les catastrophes (séisme, inondation, cyclone), les conséquences sur le territoire s'affranchissent des barrières matérielles et immatérielles qui ont été établies par l'Homme. Les conditions de formation de l'événement naturel, son emprise et ses conséquences (dommages) seront indépendantes des limites territoriales.

Même si ce moyen d'agrégation spatiale implique un lissage statistique de la donnée, *c.-à-d.* une simplification des réalités observables sur le terrain, le choix d'une résolution adaptée (suffisamment fine) permet de s'en rapprocher au maximum. Nous estimons que cette technique offre un bon compromis vis-à-vis des blocs urbains utilisés dans les productions de Copernicus. L'intérêt est donc de pouvoir contenir l'information sous la forme de clusters réguliers, facilement reproductibles et regroupant la donnée tout en permettant une analyse objective du territoire.

7.1.2. Contraintes du quadrillage géométrique

Comme toute représentation spatiale, le quadrillage géométrique présente des limites qu'il convient de prendre en compte. Comme le fait remarquer Zaninetti (***2005***), « les indices de structures spatiales de l'écologie méritent d'être connus des géographes et d'être utilisés comme complément de l'indice de dispersion ». Cependant, cette méthode « renonce à la précision du géoréférencement et introduit des effets de découpages arbitraires de l'espace ». Elle ne tient pas compte des limites naturelles et son aplat surfacique déborde des secteurs terrestres. En effet, la carte est composée en deux dimensions, l'une thématique (nombre de bâtiments, niveau d'endommagement, etc.) et l'autre géographique (dimension du terrain traduite à l'échelle) (***Andrieu, 2014***). Ces problèmes de limites naturelles et de représentativité des espaces géographiques renvoient aux questions relatives au dimensionnement des mailles. Il est question de la surface optimale des mailles par rapport aux échelles cartographiques et des biais introduits par le niveau de généralisation des méthodes de carroyage. Toutefois, ce dernier sera moins contraignant aux petites échelles (***Klett, 2011***).

Une autre limite concerne la confrontation avec d'autres données carroyées qui n'ont pas la même résolution et correspondance spatiale (dépendant aussi de la géométrie du carroyage) rendant difficiles leur comparaison et leur interopérabilité. En outre, il ne faut pas omettre les problèmes de décalage engendrés par des transformations géométriques lors des reprojections ou des points d'ancrage différents de la méthode d'agrégation. En effet, deux grilles de même résolution, mais décalées en x ou y n'offriront pas les mêmes résultats statistiques. Ce faisant, l'exploitation et le développement d'une représentation cartographique à partir d'un carroyage nécessitent la construction d'un référentiel pérenne dans le temps. D'autant plus que dans le cas où les données sont diffusées sous la forme d'entités ponctuelles. Il sera aisé de les exploiter sous SIG et de les intégrer dans un système d'agrégation standardisé.

Enfin se pose la question de l'affichage de données qualitatives. Dans le cas d'une représentation des niveaux de dommage, une maille comprenant 75 entités totalement détruites sera affichée de la même manière qu'une maille ne comprenant qu'une seule entité du même niveau de dommage (***Voigt et al., 2011***).

Les limites qui viennent d'être énoncées ont été intégrées à notre démarche. Ainsi l'application du carroyage doit être réalisée à des échelles pertinentes et ses dimensions déterminées de façon à ne pas générer trop de biais vis-à-vis de la dispersion des données. Malgré la perte de précision des données géoréférencées par rapport à d'autres méthodes plus précises comme l'interpolation, il faut toutefois noter que l'utilisation du carroyage permet d'éviter la surcharge visuelle à un certain niveau d'échelle. De fait, nous décidons d'exploiter les capacités de simplification visuelle et cognitive, mais aussi de stabilité de cette technique pour afficher une information à la fois qualitative (intensité) et quantitative (volume) des dommages. Pour répondre à la problématique de l'affichage simultané de ces deux informations à partir du carroyage, nous explorons les possibilités offertes par l'implantation ponctuelle en recourant aux nouvelles méthodes existantes développées sous SIG.

7.1.3. De l'implantation zonale à l'implantation ponctuelle

Par définition la maille est une implantation zonale dont la géométrie ne peut être altérée sans perdre les avantages de sa régularité. Aussi, ce type d'implantation bloque les variables de taille et de forme, mais également d'orientation qui peuvent être néanmoins récupérées par la variable de grain (***Metz & Bertin, 1971***). Cette dernière, avec les variables de valeur et couleur, sont les seules à être disponibles pour ce type d'implantation. *A contrario*, l'utilisation de figurés ponctuels permet de faire varier six variables graphiques énoncées par Bertin (***Bertin, 1967***) : la taille, la forme, l'orientation, la valeur, la couleur et le grain.

Des solutions graphiques existent à partir de cette implantation zonale. Il est possible par exemple de faire varier la « taille en 3e dimension réelle », ce qui correspond à une représentation en relief ou 3D (***Bertin, 1967***). Cependant, cette méthode se confronte à des difficultés comme la préservation des dimensions planimétriques de la carte. La visualisation quantitative en implantation zonale reste plus limitée que l'implantation ponctuelle qui profite de 6 variables visuelles. Parmi ces dernières, la variable de taille est la mieux placée pour répondre à nos besoins, la variation de couleurs étant privilégiée pour illustrer des informations qualitatives. La variable de taille permet à l'œil d'établir rapidement une estimation même si cette dernière est approximative. Le lecteur d'une carte ressent les différents paliers de taille à travers des impressions psychologiques. Il pourra dire si tel figuré est deux fois plus grand ou plus petit que tel autre, contrairement aux couleurs et aux autres variables d'orientation et de forme. De plus, si l'implantation ponctuelle est trop petite, il devient difficile d'apprécier visuellement les variables de valeurs, de couleurs, de forme, d'orientation et pour finir, de grain (***Metz & Bertin, 1971***).

À partir de cette implantation ponctuelle, Andrieu (***2014***) a détaillé trois principales techniques utilisées. Deux d'entre elles, les plus courantes, font concessions de la sémiologie graphique, une troisième, moins connue, semble beaucoup plus légitime aux yeux de Bertin (***Andrieu, 2014***).

La première fait référence à l'utilisation **d'un unique point proportionnel** implanté au centroïde de chaque entité (Figure 76,a). La taille du point varie en fonction de la quantité d'objets qui se trouvent dans la zone concernée. Cette solution est courante et elle est utilisée dans de nombreuses applications cartographiques et SIG. Cependant, elle a comme principal défaut de réduire la représentation d'une information au centre de l'étendue de sa surface de référence. Il est alors difficile pour le lecteur d'apprécier l'extension spatiale des objets sur cette surface. C'est du moins le cas lors d'un maillage administratif ou des blocs urbains. En outre, lorsque le maillage est irrégulier et/ou devient trop fin, la superposition des points proportionnels devient inévitable, nuisant à la lisibilité finale de la carte.

La seconde est appelée « **points égaux** » **ou** « **carte à points** » (Figure 76,b)**.** Ces derniers sont répartis de manière aléatoire en fonction de leur quantité dans chacune des surfaces qui compose un maillage. La technique est soumise à des contraintes visuelles qui ne sont pas des moindres. Dès que la concentration du phénomène est trop importante, il devient difficile de distinguer les quantités. C'est également le cas lorsque les surfaces de références deviennent trop petites. De plus, les points sont répartis sans considération de la localisation des phénomènes représentés. Cela pose un problème lors que les surfaces du maillage deviennent trop importantes. Est-ce que le phénomène est diffusé dans l'espace ou est-il concentré ? Cette méthode peut provoquer des biais d'interprétation pour un lecteur non averti. En effet, un point isolé peut être assimilé à un lieu volontairement localisé par le concepteur de la carte.

La troisième technique est plus méconnue par rapport aux deux autres (***Andrieu, 2014***). Du nom de son auteur, les « **points Bertin** » (Figure 76,c) constitue un semi régulier de points dont la taille varie en fonction de la quantité d'objets répartis sur chaque surface de référence servant à cette abstraction graphique (***Bertin, 1967***). Cette méthode convertit une implantation zonale en un ensemble de points dont la structure est moins réductrice que la technique du point unique (1er méthode). Andrieu (***2014***) fait le constat suivant : même si cette technique est relativement simple à mettre en place aujourd'hui grâce aux outils informatiques, elle a été très peu exploitée à l'époque de Bertin à cause du manque d'automatisation. Ce manque d'utilisation et de visibilité aboutit à une sous-exploitation de cette méthode dans les outils contemporains.

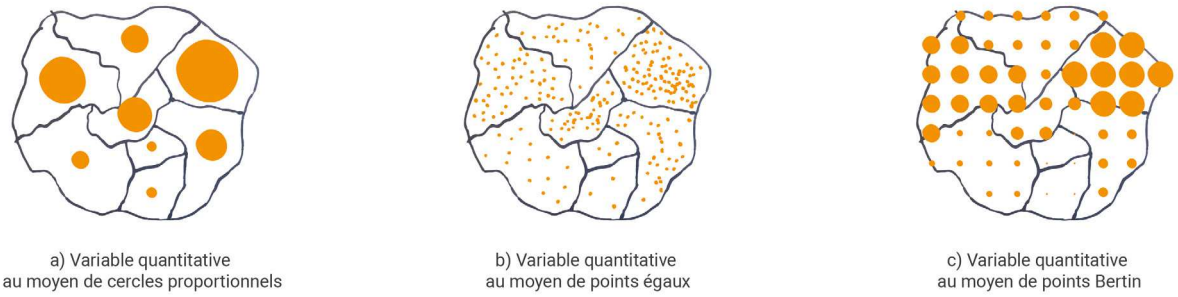


Figure 76 : les trois principales solutions graphiques à la représentation du quantitatif zonale

Les trois méthodes précédemment citées s'appliquent selon des unités spatiales de référence de comptage. Elles sont définies à partir d'un maillage dont les dimensions peuvent être variables comme c'est le cas des limites administratives de notre exemple (Figure 76). Or, rappelons que ce maillage présente des défauts, dont celui de l'absence de visibilité sur la répartition spatiale des données à l'intérieur de ces unités spatiales de référence.

La technique de Bertin est intéressante, car elle offre visuellement un résultat inscrit dans l'esprit de la sémiologie graphique. Elle permet entre autres de visualiser efficacement les proportionnalités par entités administratives, mais également d'en estimer les densités. Cependant, comme pour les deux techniques précédentes, il est difficile d'estimer la véritable dispersion spatiale des objets. Comme explicité précédemment, cette notion est importante en gestion des risques et plus généralement en géographie. Dans le cas des cartes de dommages, cette analyse spatiale sert principalement à estimer les secteurs les plus endommagés. Grâce aux outils informatiques il devient désormais possible d'envisager une solution hybride entre l'utilisation du point unique proportionnel et du semi-régulier de Bertin. Ainsi, nous avons développé une quatrième technique bénéficiant d'une part des avantages analytiques et statistiques du carroyage et de sa géométrie régulière et d'autre part des capacités de la variable de taille en implantation ponctuelle.

7.2. Proposition d'une représentation fondée sur le semi-régulier de points

7.2.1. Vers la visualisation d'une information qualitative et quantitative

Discrétisation des dommages à partir du carroyage

Travailler à partir du carroyage contraint de passer d'entités unitaires (ici les bâtiments endommagés) à des données agrégées à des mailles standardisées. Ces procédés entraînent un traitement statistique appelé réduction statistique, ou bien discrétisation. Cette dernière implique deux types de paramètres : la position et la dispersion. Le premier permet de résumer une série par une valeur tandis que le second permet d'évaluer la position d'une valeur par rapport aux autres ou vis-à-vis d'une valeur centrale. Une série statistique est donc composée de valeurs minimales et maximales ainsi que de valeurs centrales. Ces dernières sont calculées par trois principaux indices de tendance centrale : moyenne, médiane et fréquence (mode). Afin d'observer les niveaux de dommages à la maille, nous avons comparé ces différentes méthodes de positionnement statistique :

- **La moyenne** : Ce calcul (noté $\bar{x}$) est appelé centre de gravité d'une série statistique. Elle est couramment utilisée, parfois à tort, pour résumer en une seule valeur l'échantillon étudié. Calculée en divisant la somme de toutes les valeurs par l'effectif total de l'échantillon, elle a comme principaux défauts d'être influencée par les valeurs extrêmes et de fournir des valeurs qui ne correspondent pas forcément aux variables étudiées.

- **La médiane** : Ce paramètre (noté $Q2$) ordonne la série statistique par ordre croissant qui est ensuite séparée en deux parties égales. Quand l'effectif est pair, la médiane concerne tout nombre qui est compris entre les deux valeurs centrales. Quand il est pair, il s'agit de la valeur centrale. Moins utilisée que la moyenne, elle peut toutefois se montrer plus utile, notamment lorsqu'elle est couplée à la moyenne.

- **La fréquence (mode)** : Cette méthode implique toute valeur de l'effectif dont la fréquence est la plus grande, *c.-à-d.* dont le nombre d'apparitions est plus élevé que les autres variables de la série. Cependant, dans une série statistique il se peut qu'il n'y ait pas qu'une seule valeur dominante, mais plusieurs en fonction du type de distribution. Celle-ci pourra être unimodale, bimodale ou plurimodale.

Chacune de ces méthodes présente un intérêt afin de discrétiser les niveaux de dommage par maille. Sur une distribution unimodale et symétrique, ces trois calculs donnent des résultats équivalents. Cependant pour une distribution asymétrique et selon le type d'étalement observé, les résultats seront différents. Statiquement, la fréquence peut être moins représentative des données, car la classe la plus fréquente ne se situe pas forcément au centre de la distribution. Néanmoins, elle présente l'intérêt de pouvoir être utilisée pour des données qualitatives non ordonnées. La médiane, quant à elle, ne souffre pas de la variation des valeurs extrêmes *a contrario* de la moyenne. Cela peut représenter un inconvénient lorsqu'une valeur extrême est justifiée et que cela aboutit à une perte de sensibilité par rapport à la moyenne.

Face aux avantages et inconvénients de chacune de ces méthodes de discrétisation, nous avons proposé une méthode alternative basée sur **l'analyse d'une fréquence améliorée** (cf. infra). Cette dernière est fondée sur la position géographique des niveaux de dommages, ici observés à partir des images satellites, et sur la possibilité de regrouper ces derniers lorsque la distribution admet plusieurs valeurs dominantes dans les répartitions statistiques. À titre d'exemple, nous avons pris le cas des données EMSR232 et EMSR 234 (2017) fournit par le service Copernicus sur le territoire de Saint-Martin (Petites Antilles française) après le passage du cyclone Irma en septembre 2017. Cette donnée attribue un niveau de dommages (information qualitative ordonnée) aux entités surfaciques (polygones) représentant les 27 610 bâtiments touchés par le cyclone.

A partir de ces données, une première démarche a consisté à extraire les différents seuils d'endommagement qui ont alors été classés de 1à 4 soit : *01-Negligeable à léger ; 02-Modéré ; 03-Sévère et 04-Détruit*. Un premier comptage du nombre d'entités de chacun de ces seuils a été effectué en utilisant un carroyage régulier de forme hexagonale aux dimensions de 300 (*h*) par 346 (*l)* mètres (Figure 77). Le pourcentage de chacun de ces niveaux de dommages a été calculé par rapport au total de bâtiments concernés pour chaque maille. Ce premier traitement a permis d'observer la répartition spatiale des niveaux d'endommagement sur le territoire de Saint-Martin. Nous avons constaté sans difficulté les zones présentant un grand nombre de dommages légers (les Terres-Basses) tandis que certains secteurs comme Marigot concentraient des dommages particulièrement importants (Figure 77).

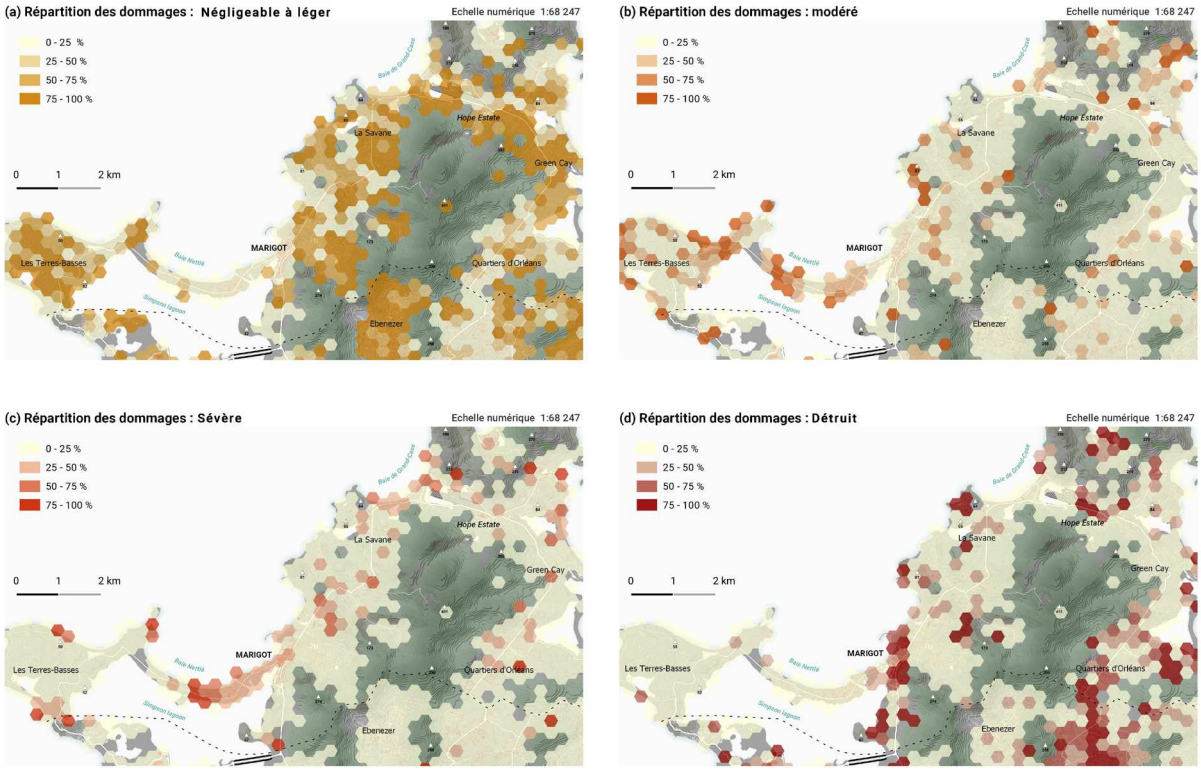


Figure 77 : Analyse de la répartition des différents niveaux de dommages (données : Copernicus EMSR, 2017)

Les différents niveaux de dommages sont juxtaposés grâce à un ensemble de requêtes afin de faire ressortir dans un premier temps leurs taux de représentativité typologique. Pour cela, le traitement a débuté par le regroupement des niveaux d'endommagent en deux classes : « sévère à détruit » et « modéré à négligeable à léger » que nous avons définis comme des « paliers ». Cette première requête spatiale a été essentielle dans notre calcul de **la fréquence améliorée**. Les requêtes suivantes ont consisté à sélectionner et à afficher les niveaux de dommages ≥50% des bâtiments de chaque maille. Puis, elles ont interrogé la représentativité des différents paliers lorsque les pourcentages étaient <50%. Dans le cas de deux pourcentages similaires : 25% de bâtiments détruits et 25% de bâtiments aux dommages modérés, les requêtes ont permis de comparer le total que représentait le groupement de chaque « palier ». Si la variable « sévère à détruit » était supérieure à 50% alors, le niveau de dommage de ce palier était privilégié et inversement. Lorsque le pourcentage de deux niveaux de dommages contenus dans le même palier était similaire, alors le niveau le plus pessimiste était sélectionné. Dans le cas où cet ensemble de requêtes ne pouvait déterminer de tendance en fonction des paliers alors les requêtes étaient paramétrées pour considérer que le niveau de dommage statistique ne pouvait être déterminé. La procédure a été similaire si chacun des niveaux représentait 25% des entités évaluées. Néanmoins, ces cas ont été plus rares et ont eu tendance à être réduit par la diminution du nombre de classes de dommages.

Les résultats obtenus par cette méthode de fréquence améliorée ont été comparés avec ceux des différents types de calcul exploitables sous SIG (Figure 78), à savoir la moyenne, la médiane et la fréquence (mode). La médiane a fourni des résultats très proches de notre méthode. La moyenne a eu tendance à surestimer les niveaux de dommages sur certains secteurs et inversement pour le mode.

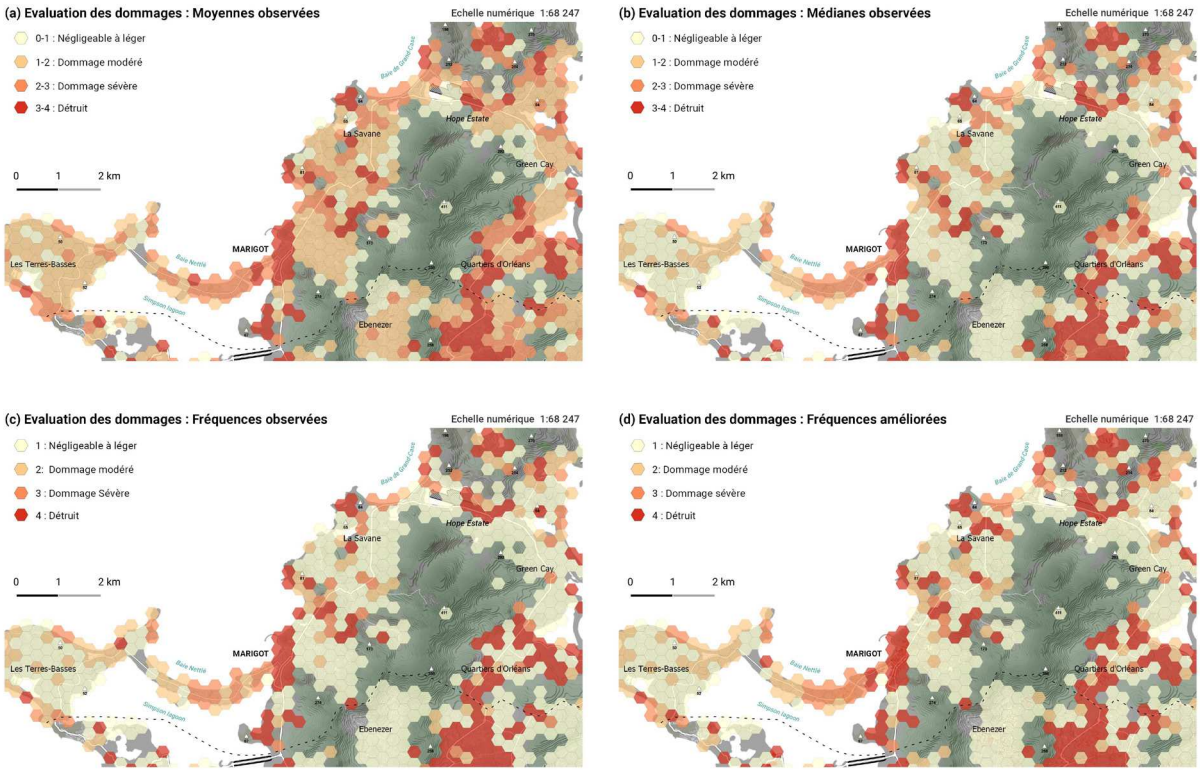


Figure 78 : Comparaison des différentes méthodes de calcul statistique et de la fréquence améliorée des niveaux de dommages (données : Copernicus EMSR, 2017)

De l'implantation zonale régulière à la création d'un semi-régulier de points proportionnels

Pour exprimer la variable quantitative (le volume de bâtiments endommagés), nous proposons de passer d'une l'implantation zonale à un semi-régulier de point mobilisant le centroïde des mailles qui composaient notre carroyage. Cette méthode permet la combinaison des techniques des cercles proportionnels et des points de Bertin avec comme principale caractéristique, des surfaces d'attribution dont les géométries sont invariables (Figure 79). Les biais d'interprétation de ces deux méthodes ont été réduits en amenant l'analyse à des résolutions plus fines et comparables. Cette nouvelle technique revient à associer un effectif statistique au point central des mailles homogènes.

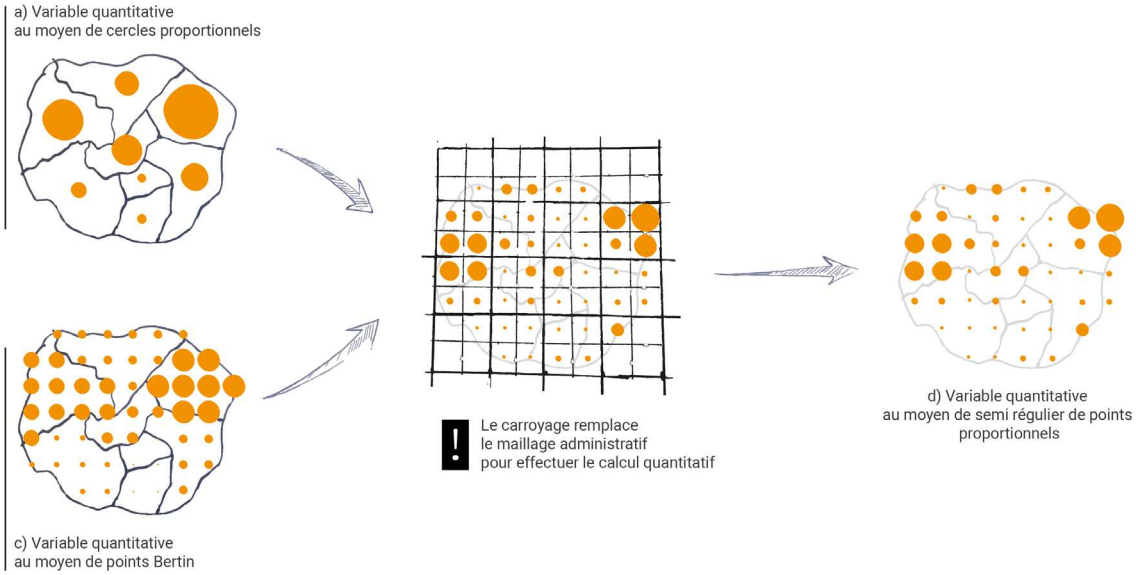


Figure 79 : Création d'une méthode hybride (d) entre le point unique (a) et les points de Bertin (c)

Toujours selon ce cas de figure, la taille des cercles représente le nombre de bâtiments endommagés échantillonnés au sein de chaque maille. L'intérêt du carroyage est sa capacité à faire varier les indicateurs. Par exemple, il est possible de moduler les proportionnalités en fonction du nombre total de bâtiments, et en prenant en considération les bâtiments qui ne souffrent d'aucun dommage. Ou bien encore, il est possible d'indiquer les pourcentages du type de dommages le plus fréquent analysé dans chaque maille. Ce processus exige une certaine réduction de l'information puisqu'il supprime la localisation des entités diagnostiquées, mais présente l'avantage de garder les proportionnalités observables sur le terrain. Ainsi, la Figure 79 facilite théoriquement le repérage des poches importantes d'entités géographiques dans les unités spatiales de références, tout en permettant d'en mesurer la densité (d). Notons par ailleurs que ce lissage géographique peut être volontaire en fonction des thématiques abordées et du degré de confidentialité que souhaite préserver le commanditaire, notamment lors d'une diffusion grand public.

En résumé, l'information qualitative, qui concerne nos quatre niveaux de dommages, est calculée pour chacune des mailles. La donnée agrégée en implantation zonale est ensuite traduite en implantation ponctuelle en utilisant le centre des polygones afin de créer un semi-régulier de points proportionnels à la quantité de bâtiments endommagés analysés. Chaque point détient ainsi une information quantitative et qualitative dont il convient d'optimiser l'affichage grâce à des choix techniques et sémiologiques.

7.2.2. Choix techniques et sémiologiques pour la représentation du semi-régulier de points proportionnels

Variable de forme des mailles géométriques

Réfléchir à la géométrie des mailles possède toute son importance. Cette géométrie définit les surfaces d'échantillonnage et donc de calcul des données, mais aussi leurs capacités visuelles. Le carré est la forme la plus connue, mais nous retrouvons également l'hexagone ou encore le triangle. Nous faisons le choix d'une maille hexagonale, car cette structure offre certains avantages. En effet, elle permet de réduire les déformations d'échantillonnage en se rapprochant sensiblement de la forme circulaire (***Krebs, 1989***) tout en assurant la constitution d'une grille continue ; paramètre qui fait le principal défaut du cercle. Le rapport périmètre/surface, proche de celui du cercle, minore les effets de lisière (Blondel & Ferris, 1995) et implique une abstraction plus naturelle des données ; critère qui fait défaut au carroyage carré. Avec ses six côtés, la maille hexagonale est connectée à six autres voisines. Ce faisant, elle réduit les ambiguïtés dans la lecture de la carte en évitant les problèmes topologiques observables en analyse spatiale (***Paegelow, 2004***). C'est aussi un découpage qui possède l'avantage d'optimiser le remplissage d'une surface. On le retrouve dans la nature comme dans les prismes de dissection ou les ruches par exemple. En plus de ses avantages fonctionnels, ce sont ses capacités visuelles qui sont intéressantes. D'un point de vue rétinien, l'hexagone est moins rectiligne et donc moins rigide à l'œil (***Birch et al., 2007***). Cela optimise la lisibilité et rend plus facile l'interprétation des données (***Carr et al., 1992***). Néanmoins, afin d'observer sa réelle efficacité vis-à-vis d'autres formes, nous avons mis à l'épreuve cette géométrie à celle du carré dans une expérimentation ultérieure (cf. infra 3.1).

Variable de taille des points proportionnels

Une des notions clés de notre approche cartographique a résidé dans la capacité de perception de l'humain et de l'image qui va se former au fond de la rétine lors des processus pré-attentifs. La variable de taille a été utilisée pour représenter la proportionnalité des données observées au sein de chaque maille. Lorsqu'il évoque cette variable, Bertin (***1967***) utilise la dénomination de variables rétiniennes par opposition aux variables musculaires. La distinction entre les deux groupes de variables n'est pas aussi évidente qu'il y parait. Les variables musculaires correspondent aux deux dimensions du plan, *c.-à-d.* la position d'une tâche sur son espace support. En outre, elles sont propres à la « composante géographique » des cartes (***Metz & Bertin, 1971***). Ces variables impliquent que leur perception par le lecteur ne soit possible que par un balayage oculaire de l'image graphique. Les variables dites « rétiniennes » permettent d'ordonner, de séparer et de classer les informations rapidement. Cependant, elles peuvent nécessiter aussi des mouvements oculaires (musculaires) lorsque les surfaces à déchiffrer sont trop étendues (***Metz & Bertin, 1971***). Bertin parle d'ailleurs de « variables d'élévation » ou de « troisième dimension », *c.-à-d.* d'une expression structurant l'espace réel. Cette notion est importante pour gagner en efficacité de lecture.

Nous avons déterminé que l'hexagone est une forme plus naturelle et plus lisible et par conséquent cherché à profiter des avantages visuels de cette géométrie tout en les couplant à ceux de la variable de taille. Afin d'éviter les problématiques de chevauchement, la dimension maximale des points a été

bornée à celui de la surface de comptage. Ainsi, les zones dont le nombre d'entités était élevé sont représentées par des agrégats de points dont la taille est proportionnellement plus grande. Dans le cas où plusieurs figurés de taille maximale sont contigus, ils forment un pavage dont la géométrie est délimitée par le contour de l'hexagone.

En considérant que la taille maximale de nos figurés est limitée à la dimension du maillage, nous nous sommes confrontés aux problématiques de la vision humaine et de sa non-linéarité quant à la lecture des symboles cartographiques (***Muller, 1978***). Cette perception visuelle, si elle n'est pas respectée, peut rendre difficile la comparaison des proportionnalités. En outre, la recherche psychophysique a révélé que les lecteurs auront tendance à sous-estimer les surfaces et volumes. Il faut donc prendre en compte l'étendue des variations de taille entre la plus petite et la plus grande valeur. Sachant que le seuil de perception minimale varie entre 0.2 et 0.5 mm^2, un seuil équivalent sera utilisé. En raison d'un affichage étendu des cartographies sur écran, est également considérée la taille des pixels sur ordinateurs qui est approximativement de 0.18 à 0.6 mm de côté (***Bessadok, 2015)***. Cette dimension dépendra très largement de la taille de l'écran et de sa résolution. Pour calculer le seuil minimal de perception pour les écrans, le calcul suivant a été utilisé :

$$Seuil\ minimal\ de\ perception = (taille\ du\ pixel\ en\ milimètre * 3)^2$$

Il a été possible de réduire les biais d'interprétation de ces variations de taille en établissant des classes prédéfinies qui respectent la « gamme naturelle des tailles croissantes » (***Bertin, 1967***). Pour cela, une variation de taille a été appliquée selon une compensation de Flannery, soit avec un coefficient de 0.57 (***Flannery, 1971***). Ce dernier a travaillé sur la relation entre les dimensions réelles et les dimensions visuelles afin d'assurer leur correspondance graphique (***Muller, 1978***) et ainsi faciliter la distinction des valeurs proches visuellement. Cela a abouti à la mise à l'échelle perceptive des symboles proportionnels. Cette approche a été critiquée par Edward Tufte (***Tufte, 2001***) pour qui, les quantités représentées graphiquement doivent être strictement proportionnelle au numérique, sans quoi il y a un risque de mauvaise interprétation des valeurs. Dans notre cas, cette recherche d'information doit être facilitée visuellement afin d'attirer l'œil vers les zones les plus touchées. Le choix a été fait de tester cette compensation au sein de notre représentation cartographique.

Par ailleurs, la variation de taille du figuré est étroitement liée à l'échelle cartographique dont vont dépendre les variations d'échantillonnage. Notre démarche a donc été appliquée dans un premier temps à des échelles prédéfinies à partir des standards Web Mercator en vue de tester cette visualisation et d'assurer son portage à des outils de géovisualisation. Nous reviendrons ultérieurement sur la capacité de cette technique à intégrer un continuum sémiologique multi-échelle.

Des variables visuelles pour représenter les gradients de dommages

La sémiologie graphique nous apprend qu'il existe plusieurs variables pour ordonner des informations et en même temps assurer leur différence. Les variables de taille, de valeur ou encore de grain permettent d'ordonner l'information. Elles peuvent être couplées aux variables de couleur et dans une moindre mesure d'orientation pour assurer la sélectivité des données. Bertin (***1967***) indique également que la valeur et la taille restent prédominantes. Dans cette étude, la taille étant déjà mobilisée

pour visualiser les quantités, les variables de valeur et de couleur ont été privilégiées pour illustrer les niveaux de dommages. La variable de couleur était considérée par Bertin comme moins efficace pour ordonner des informations complexes. Elle se montre plus utile pour marquer la « différence entre deux modalités d'une variable différentielle » (***Jégou, 2014***). « Une bonne harmonie des couleurs permet également de rentre la carte attractive et esthétique » (***Lambert & Zanin, 2016***). Ces deux variables, valeur et couleur, sont toutefois complémentaires, car elles offrent la possibilité de travailler sur l'expression sémiotique d'une information. La couleur notamment est connue pour avoir un sens, une expression. Loin d'être un simple facteur de différenciation, elle transmet une information iconique et plastique[32] liée à des stimuli sensoriels qui conduisent à des interprétations subjectives et inconscientes (***Gage, 1999; Jégou, 2014; Ware, 2010***). Cette notion exprime des concepts qui sont intégrés dans la mémoire du lecteur (***Chesneau, 2006***). Elle diffère selon le type de culture, d'époque, d'âge, etc. d'une personne (***Lambert & Zanin, 2016***).



Figure 80 : Échantillon colorimétrique d'iconographie en lien avec les désastres

Les désastres, dont l'origine peut être naturelle ou anthropique, développent une iconographie née des sentiments qu'ils engendrent. En nous intéressant à cette dernière, nous avons remarqué certaines tendances dans le choix des couleurs pour représenter le phénomène et son impact (Figure 80). Un échantillon d'œuvre plus ou moins connue démontre l'utilisation courante de couleurs chaudes et de contrastes entre les couleurs claires/obscures afin de représenter les dommages causés par l'événement.

[32] Forme graphique qui caractérise une ressemblance visuelle entre signifiant et signifié (le signifié étant un arbre et le signifiant la forme graphique qui le représente)

La catastrophe développe des sentiments d'angoisse et de détresse que l'on retrouve par exemple dans l'œuvre de Edvard Munch, le Cri, de 1893, exposé à la galerie nationale de Norvège à Oslo. Cette œuvre expressionniste souligne le sentiment que l'auteur éprouve en voyant un ciel couleur sang et feu. Certains auteurs pensent qu'il est associé à l'éruption du Krakatoa de 1883 et ses perturbations atmosphériques (***Gollier, 2019***).

Rappelons également que les cartes de dommages *post*-catastrophes empruntent cette influence sémiotique. Les dommages sont majoritairement retranscrits par des couleurs chaudes (Figure 81). Les dommages les plus forts sont généralement de couleur rouge, voire rouge foncé, avec un passage à l'orange et au jaune ou vert pour les dégâts les plus légers ; et ceci, quel que soit le type d'aléa (cf. supra 5.3.2).

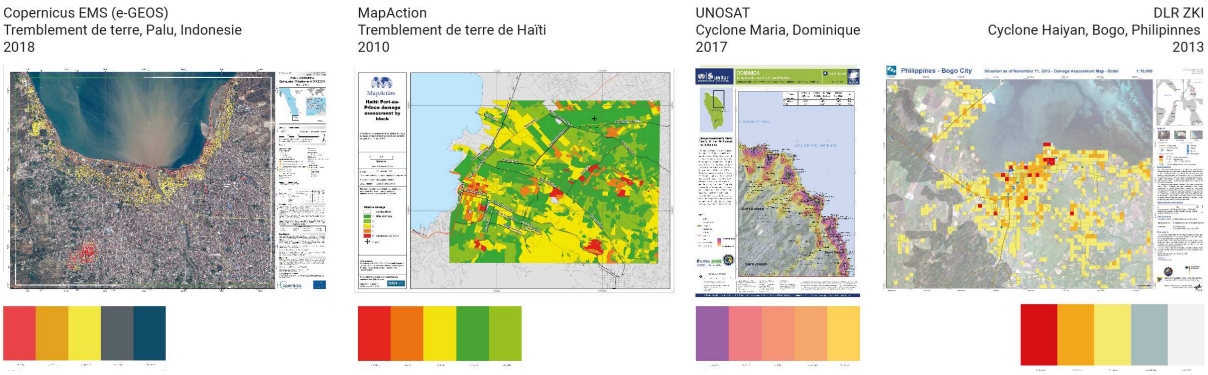


Figure 81 : Échantillon colorimétrique des cartes de dommages post-catastrophes

Ces choix semblent être le fruit d'une perception intime des couleurs, des émotions qu'elles provoquent chez l'individu (***Itten, 1967***). Il est donc nécessaire d'intervenir sur ces paramètres cognitifs afin d'améliorer la lisibilité de notre information thématique, en facilitant l'analyse des degrés d'endommagement et en assurant également sa capacité à se détacher du fond de carte utilisé.

Les travaux de Chesneau (***2006***) ont aiguillé nos recherches quant aux possibilités d'amélioration de la lisibilité des données. L'auteure démontre l'intérêt de la plateforme en ligne ColorBrewer[33] (***Harrower & Brewer, 2003***) pour la création et la combinaison de couleurs. Cet outil informatique répond aux besoins de visualisation simples et accessibles pour les géographes, cartographes. Il dispense à ces utilisateurs, des mini légendes en fonction de la spécificité des données (si elles sont qualitatives, séquentielles ou divergentes) et du nombre de classes souhaité. Ces mini légendes sont accompagnées des codes *RVB*, *CMJN* et *Lab*. Nous avons utilisé cet outil afin de proposer des niveaux de dommages gradués selon un dégradé de tons chauds. Les teintes ont été choisies afin de maximiser la différenciation malgré les processus d'impression, des différences d'écran, ou des troubles de la vision impliquant les couleurs (protanopie ou deutéranopie). Ces variables de couleurs sont appliquées sur un fond de carte dont les teintes sont passées en nuance de gris ou désaturées. Ce choix a pour objectif de casser la surcharge visuelle des images satellites en couleurs.

[33] *https://colorbrewer2.org/#type=sequential&scheme=BuGn&n=3*

L'ensemble de ces procédures techniques et de ces choix sémiologiques ont abouti à la représentation suivante (Figure 82). La carte représente l'évaluation des dommages du service Copernicus EMS (EMSR232 et 234, 2017) sur l'île de Saint-Martin. Les hexagones sont proportionnels à la quantité de bâtiments touchés et leurs dimensions sont limitées aux surfaces des mailles qui composent le carroyage (*346m de largeur & 300m de hauteur*). Les couleurs chaudes, créées à partir de la palette séquentielle de *Color Brewer*, représentent les dommages les plus légers (jaune : #fef0d9) au plus forts (Rouge : #d7301f). La carte présente ainsi une donnée quantitative et qualitative à petite échelle.

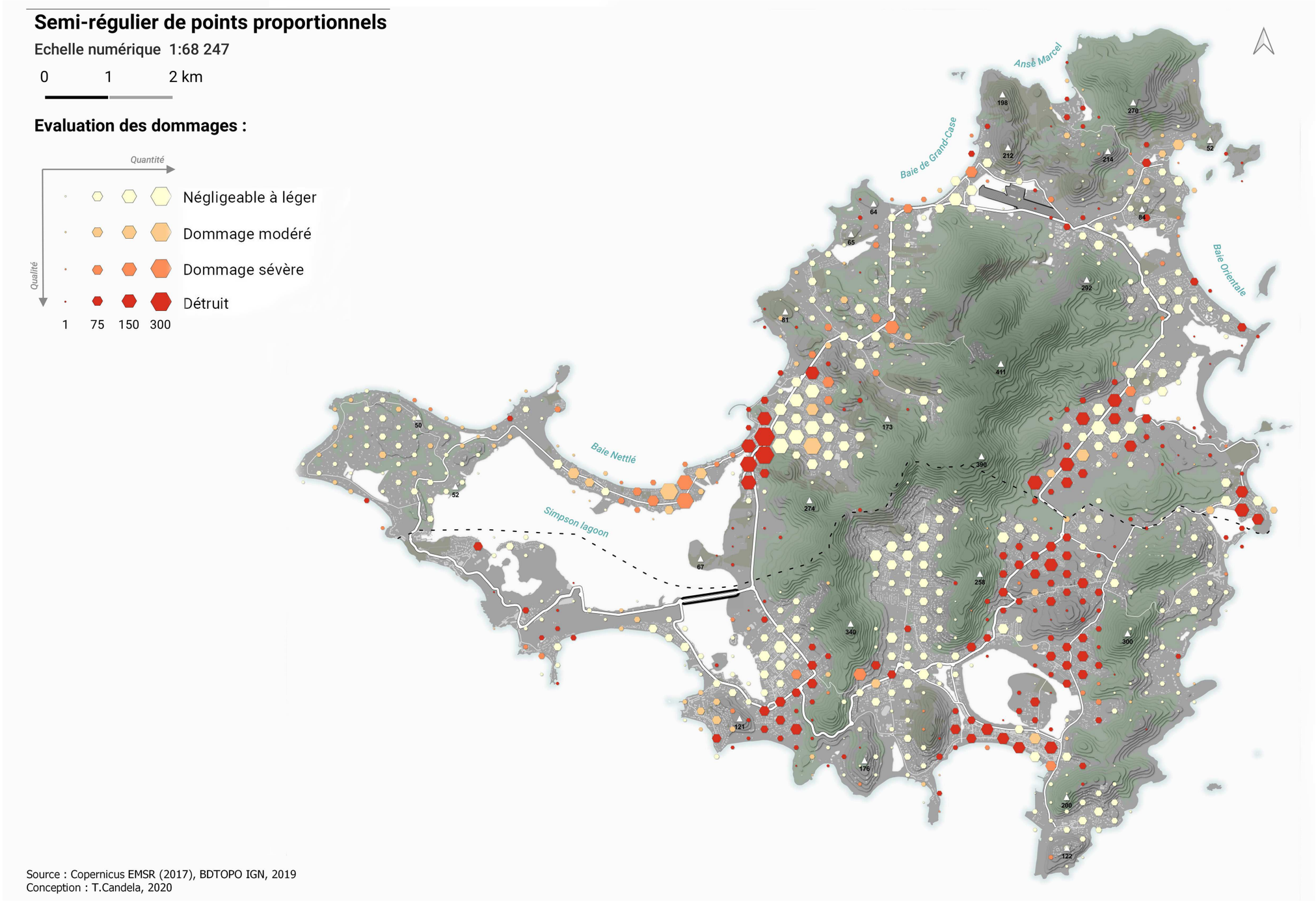


Figure 82 : Représentation des dommages par semi-régulier de points proportionnels

Chapitre 8 : Analyser les capacités cognitives et sensorielles des représentations cartographiques des dommages *post*-catastrophes

8.1. Mesures de l'activité cognitive à partir de la mémorisation d'une information thématique

Cette étape de nos travaux cherche à définir les capacités cognitives du semi-régulier de points proportionnels vis-à-vis de représentations couramment employées dans la cartographie des dommages *post*-catastrophes. Pour cela, l'expérimentation #2 a été fondée sur une requête de mémorisation et de retransmission graphique des informations thématiques d'une carte lorsque celle-ci n'est plus affichée. Cette approche est assez similaire aux méthodes de la cartographie des ressentis et des enquêtes de perception que l'on peut retrouver en géographie (***Arnaud, 2020 ; d'Ercole & Rançon, 1994; Fauteux, 1977 ; Strazzeri & Manche, 1998***). Lors des enquêtes, des fonds de carte ont été utilisés pour mesurer la somme d'expériences cognitives correspondant à la perception et les connaissances de chaque individu. Les dessins tout d'abord individuels permettent progressivement de dégager des espaces communs de ressentis pour l'ensemble des individus (***Arnaud, 2020***). On parle alors « d'espace partagé » constitutif d'un groupe (***Roulier, 2013, André, 1989***). Ce critère de groupe est intéressant puisqu'il s'associe à une distinction des capacités de perceptions, des connaissances cartographiques et d'interprétation. Il fait le lien avec certains critères comme la formation initiale et les métiers exercés, car ils influencent l'individu et sa relation avec son environnement (***MacEachren, 1995; Petchenik, 1983; Rimbert, 1973***). Dans notre cas de figure, l'expérience cognitive peut se confronter au manque de pratiques et à la diversité graphique qui caractérisent la cartographie des dommages *post*-catastrophes (cf. supra 5.3). Ce contexte peut avoir comme conséquence une faible reconnaissance visuelle lors de l'analyse de ces cartes. Malgré cette faible probabilité de reconnaissance visuelle, nous sommes partis du principe qu'une carte efficace était en mesure d'imprégner la mémoire de son utilisateur, au-delà de ses connaissances cartographiques. Comme décrit dans l'état de l'art, cette mémoire est mobilisée de différentes manières (cf. supra 4.1.1). À savoir, la lecture d'une carte met en marche le fonctionnement d'une mémoire de travail (**mémoire à court terme**) dont les informations recueillies sont réorganisées et comparées avec la **mémoire à long terme** (Figure 83). Cette dernière facilite ou non la capacité de réponses à des tâches d'analyse cartographique et de mémorisation. Ainsi durant cette expérimentation, nous avons voulu comprendre comment les représentations cartographiques étaient interprétées et enregistrées sur de courts laps de temps puis traduites dans des représentations mentales (**schéma mémoriel cognitif**) par différents types d'utilisateurs (**destination**). Ainsi, les choix méthodologiques ont permis de quantifier la capacité de mémorisation des utilisateurs et celle de la carte à transmettre une information simple à enregistrer. Cette seconde expérimentation a été réalisée lors d'un colloque dédié à l'information géographique dans la gestion des risques et des crises et dans le cadre d'un atelier spécifique à la cartographie des dommages *post*-catastrophes. Elle s'appuie sur un échantillon d'utilisateurs variés (opérationnels, scientifiques, institutionnels, étudiants) étant plus ou moins sensibles à ces thématiques.

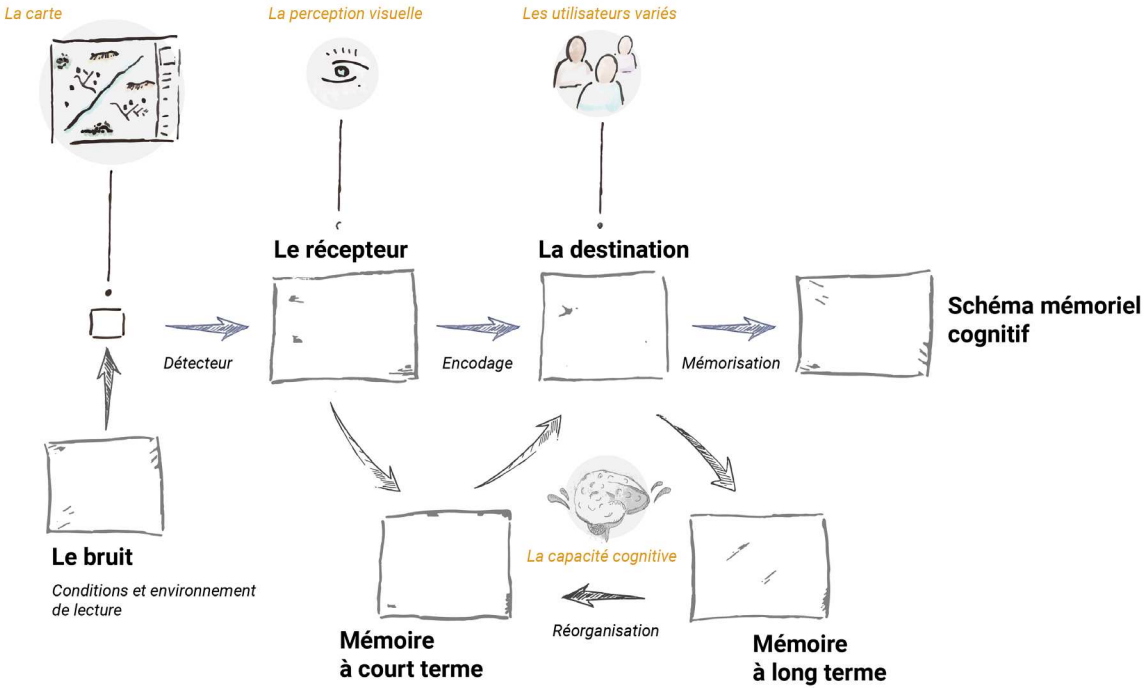


Figure 83 : Processus de lecture d'une information cartographique et mobilisation de la mémoire dans la création d'un schéma mémoriel cognitif

Pour analyser pleinement les capacités de notre représentation, un critère supplémentaire a été intégré dans la troisième expérimentation (Figure 83). En effet, le processus de mémorisation est tributaire de la perception visuelle, impliquant la capacité du récepteur à recueillir une information cartographique. Ce critère a été intégré dans la troisième expérimentation.

8.2. Mesures de l'activité visuelle à partir du suivi occulométrique

Pour comprendre complètement les processus cognitifs qui conditionnent la lecture d'une carte, il faut comprendre son principal **récepteur sensoriel : la vision** (***Board & Taylor, 1977***) (Figure 83). Les études modernes qui tendent à répondre à ce besoin sont réalisées avec les technologies de l'Eye-tracking (***Popelka et al., 2019***). Cependant, l'analyse des mouvements oculaires n'est pas toute récente. Goldberg & Kotval (***1999***) considèrent même que cette technique date de plus de 70 ans, bien avant la démocratisation de l'informatique et des ordinateurs (***Li et al., 2010***). Elle a notamment été intégrée dans l'étude des processus de perception et de raisonnement spatiaux (***Keehner et al., 2008***) ainsi que dans l'interprétation des interactions entre l'utilisateur et une interface. De nos jours, de telles études sont principalement tournées sur l'ergonomie et la sémiologie graphique employées pour l'affichage informatique (logiciel, système) ou encore web. Toutefois, quelques études utilisant cette technologie de capture oculométrique existent à l'instar des expérimentations sur les cartes d'évacuation menées par Palka (***2015***).

Fondée sur l'enregistrement et l'analyse des mouvements de l'œil, cette technique permet d'apprécier de manière objective (***Goldberg & Kotval, 1999***) les conséquences du visuel sur les processus de lecture et d'interprétation d'une carte. Cette méthode a néanmoins comme première contrainte de produire une grande quantité de données. Plusieurs études ont donc été menées pour analyser ces volumes d'informations de manière efficace (***Fabrikant et al., 2008***; ***Pillalamarri et al., 1993***; ***Ponsoda et al., 1995***). Ainsi, les études traditionnelles du suivi oculométrique et d'utilisabilité abordent généralement quatre paramètres à mesurer : la durée de fixation, la durée du regard, l'analyse des zones d'intérêts et la comparaison des chemins de balayage ***(Li et al., 2010***). Ces mesures servent à comprendre les effets d'attraction de l'image graphique, d'une carte sur le regard d'un utilisateur lorsqu'il réalise une tâche. *In fine,* ces données permettent de déduire les zones de densité du regard, ses trajectoires, etc. Dans cette présente étude, la technologie de l'Eye-tracking a été employée pour analyser la capacité sensorielle d'une gamme de variables visuelles servant à afficher les dommages.

En résumé, si le domaine sensoriel reflète fidèlement les stimuli extérieurs, il est important de prendre en compte la part de cognition subjective liée à la lecture d'une carte. L'état de l'art (cf. supra chapitre 4) a démontré que les facteurs d'ordre sémiologique et cartographique, qui excitent nos sens, sont intégrés par notre expérimentation, laquelle facilite ou non la lecture d'une carte. Cet état de l'art amène à réfléchir sur l'importance du message visuel dans un contexte où les niveaux de connaissance cartographiques sont hétérogènes ou homogènes et où les conditions de lecture peuvent être altérées par des situations de stress, (temps limité) d'environnement et qui se réfère **au bruit** (Figure 83). Les expérimentations menées dans le cadre de cette étude ont eu pour objectif de mesurer l'efficacité de la lecture d'une carte, plus particulièrement des techniques employées, à partir des mécanismes primaires qui sont liés à notre vision et à notre mémoire de travail ; et qui aboutissent à la perception de la carte. Au-delà des processus de mémorisation et de visualisation, ces deux expérimentations ont permis d'étudier leur capacité à transmettre une information correcte par l'analyse des résultats obtenus à de tâches de localisation et d'estimation. Elles intègrent également des questions sur la préférence des utilisateurs selon plusieurs critères, dont l'efficacité visuelle des représentations.

Chapitre 9 : Expérimentation #2, évaluation de l'efficacité cognitive des représentations des dommages

9.1. Définir les capacités cognitives de représentations standards et expérimentales pour un groupe d'utilisateurs variés

9.1.1. *Protocole de l'expérimentation #2*

Hypothèses de départ :

L'expérimentation #1 (cf. supra 6.3) a illustré la capacité que possèdent certaines méthodes d'agrégation statistique à faciliter la lecture et *in fne* la convergence des interprétations d'un groupe d'utilisateur homogène. Les informations groupées, notamment par l'intermédiaire des méthodes de carroyage, blocs urbains, densité et interpolation, contribuent à dégager des structures qui organisent la donnée (***Lambert & Zanin, 2016; Zanin, 2006a***). Toutefois, cette première expérimentation a mis en avant un usage erroné des données quantitatives et qualitatives qui ne semble pas perturber le niveau de certitude des participants. Des divergences d'interprétation visuelle ont également été démontrées. Ces biais sont introduits par plusieurs critères tels que le « message esthétique » de la carte énoncé par Rimbert (***1973***) ou encore le non-respect des règles de sémiologie graphique. Dans cette expérimentation (#2), nous avons souhaité tester les capacités théoriques du semi-régulier de points proportionnels en nous appuyant sur les processus de perception visuelle étroitement liés à la mémoire et à ses capacités. Il s'agit là d'éléments clefs de la compréhension et de la transmission de l'information. Ils dépendent des connaissances des utilisateurs de la carte et de leurs relations avec ces produits en général. Ainsi, l'expérimentation s'est appuyée sur des participants aux profils variés afin d'obtenir des niveaux de connaissances cartographiques et des métiers variés. Partant de ce contexte, plusieurs hypothèses se dégagent :

- Hypothèse 1 (H1) : Malgré la diversité des participants et leur connaissance en cartographie, l'état de l'art et les expérimentations précédentes témoignent d'une plus grande lisibilité des données pour les cartes qui simplifient l'information. Dans un contexte où les temps de réponse sont cadencés, les cartes qui agrègent statistiquement l'information devraient faciliter l'analyse visuelle et la mémorisation des secteurs les plus touchés, quel que soit le participant. Une facilité qui devrait se faire ressentir sur la charge d'information ressentie par les participants.

- Hypothèse 2 (H2) : Toutefois, les participants qui auront une plus grande connaissance en cartographie et/ou dont les catégories de métiers sont plus sensibles à ce type d'outils devraient mieux mémoriser les secteurs les plus touchés, ceci quel que soit le type de représentations.

- Hypothèse 3 (H3) : Une carte efficace est une carte offrant un bon compromis entre la résolution de tâche visuelle et de mémorisation. Cette efficacité technique devrait entraîner des répercussions sur l'efficacité perçue des participants. Finalement, lorsqu'il sera demandé aux participants de noter les

cartes en fonction de leur efficacité visuelle, ils devraient potentiellement favoriser les cartes qui ont été plus faciles à comprendre et mémoriser.

- Hypothèse 4 (H4) : Néanmoins et conformément avec les résultats de l'expérimentation #1, des erreurs d'interprétation sont attendues pour les cartes qui indiquent une seule information quantitative ou qualitative. Ces erreurs ne devraient pas impacter le niveau de certitude des participants concernant leur analyse.

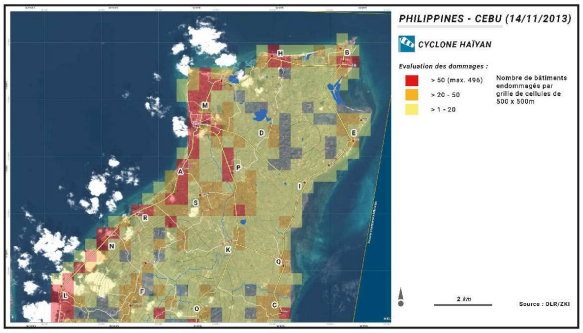
Les représentations analysées :

Pour cette expérimentation, six cartes ont été testées (Figure 84). Afin d'être exhaustif, le corpus de cartes propose différents modes de visualisation habituellement diffusés par les services de cartographie rapide. Il est complété par notre proposition sémiologique (Figure 84). Les cartes échantillonnées ont été retravaillées (des toponymes ont été rajoutés, les légendes agrandies et traduites en français et la mise en page homogénéisée) pour assurer une cohérence dans la réalisation des tâches (cf. annexe 7). À noter que deux cartes ont déjà été exploitées dans la première expérimentation (#1). Chacune des figures mobilise une représentation spécifique, soit 6 techniques au total. Elles sont élaborées à des échelles variées et présentent des dommages provoqués par deux types d'aléas (séisme et cyclone). Deux secteurs sont redondants, celui de la Baie de Port-au-Prince (Haïti) et Saint-Martin.

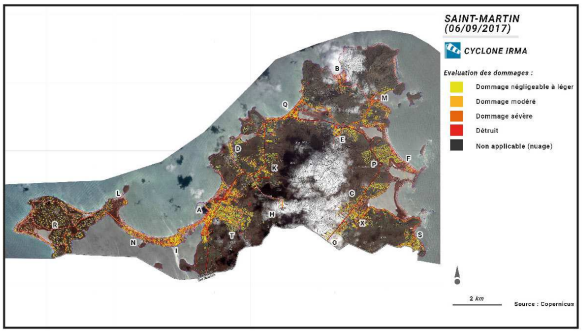
La **carte #1** montre une évaluation des dommages à la suite du cyclone Haïyan en 2013 dans la région de Cebu (Philippines). Elle a été réalisée par le service allemand DLR/ZKI et utilise la technique dite du carroyage (cf. supra. 7.1). Ici, le carroyage est construit à partir de polygones carrés d'une dimension de 500*500m. Il présente une évaluation strictement quantitative des dommages basée sur le nombre de bâtiments endommagés par maille. La classification se fait selon trois niveaux : *>1-20 ; >20-50 ; >50 (max. 496)*. Le fond de carte affiché est issu d'une image satellite auquel se superposent le réseau routier et quelques toponymes.

La **carte #2** présente les dommages causés après le passage du cyclone Irma (en 2017) sur la partie française de Saint-Martin. Produite dans le cadre du programme Copernicus (EMSR232), elle fait l'inventaire des niveaux de dommage à l'échelle du bâtiment en utilisant la BD TOPO rectifiée de l'IGN. Les dommages sont détaillés en 4 classes : *dommage négligeable à léger ; dommage modéré ; dommage sévère ; détruit*. Les bâtiments qui n'ont pas pu être analysés, notamment à cause de la couverture nuageuse, sont classés comme : *non applicables.* Cette technique, à l'instar du point au bâtiment, permet de visualiser la distribution spatiale des dommages et de mesurer les densités d'un grand nombre d'objets individuels. Par essence, cette approche se veut quantitative et qualitative. Comme pour la carte précédente, le fond de carte est issu des images satellites. On y retrouve également le réseau routier, quelques toponymes et des courbes de niveau.

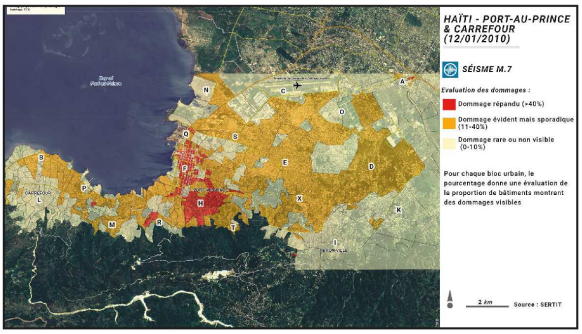
Carte #1



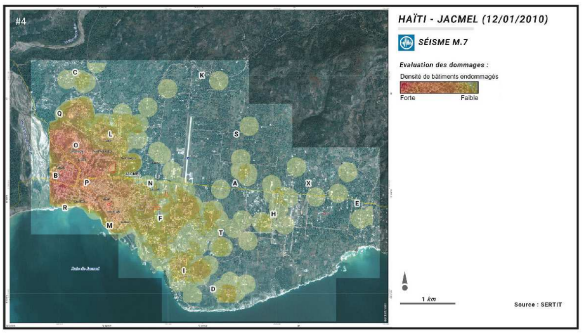
Carte #2



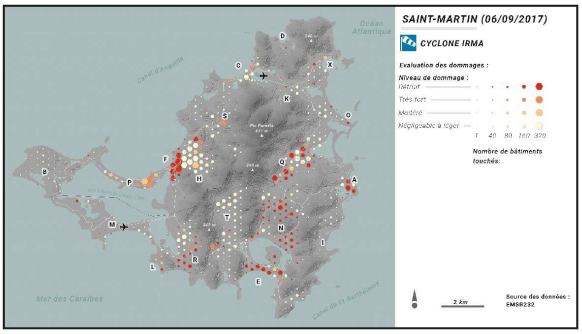
Carte #3



Carte #4



Carte #5



Carte #6

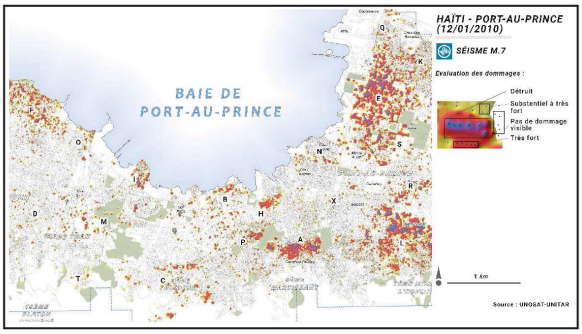


Figure 84 : Échantillon cartographique utilisé pour l'expérimentation : Carte #1, Carroyage (DLR ZKI, 2013) ; Carte #2, surface du bâti (Copernicus EMSRN049, 2018) ; Carte #3, Blocs urbains (SERTIT, 2010) ; Carte #4, Densité (SERTIT, 2010) ; Carte #5, Semi-régulier de points proportionnels (EMSR232 et 234, 2017); Carte #6, Interpolation (UNOSAT, 2010)

Après le séisme de Haïti de 2010, le SERTIT a produit plusieurs cartes des dommages dont les **Cartes #3 et #4**. La **carte #3** propose une représentation par blocs urbains des dommages dans la région de Port-au-Prince et de Carrefour. Cette méthode est la seule qui nécessite l'utilisation d'une autre donnée que les dommages aux bâtiments. Le résultat se présente sous la forme d'un réseau de polygones hétérogènes caractéristiques de la morphologie urbaine du secteur analysé. Dans le cas de **la carte #3**, les dommages sont quantitatifs. Pour chaque bloc, les dommages relatifs sont exprimés en pourcentage sur la base d'une observation des bâtiments touchés par kilomètre carré. Aucune information sur le niveau d'endommagement n'est disponible. Le fond de carte utilisé est une fois de plus une image satellite. Le réseau routier, quelques toponymes et l'aéroport sont représentés.

Dans le cas de la **carte #4**, les dommages sont présentés au moyen de la densité des bâtiments touchés. Appelée également carte de chaleur (*heat map* en anglais), cette méthode se fonde sur un rayon de recherche (de voisinage) de 200 mètres autour de chaque bâtiment considéré comme endommagé.

Il s'agit d'identifier rapidement les « points chauds » que représente la donnée ponctuelle. Cette carte offre une représentation strictement quantitative des dommages et ne dispense d'aucune information sur les niveaux (intensités) des dommages observés. Avec cette représentation c'est avant tout la capacité perceptive qui est recherchée. Le fond de carte est composé d'une image satellite *post*-événement, du réseau routier et de toponymes épars.

La **carte #5** introduit notre représentation cartographique. À l'instar de la **carte #2,** elle évalue les dommages à la suite du cyclone Irma. La principale différence avec la figure précédente réside dans les jeux de données qui sont utilisés. L'évaluation des dommages de la carte #5 est issue de l'activation des services EMSR232 et 234. A noter que cette évaluation a été produite à une date antérieure (septembre 2017) de celle affichée sur la **carte #2** (données EMSN-049 de mars 2018). Les dommages s'étendent par extension à la partie hollandaise de l'île (Sint Maarten). Nous proposons une visualisation quantitative et qualitative des dommages par l'intermédiaire d'un semi-régulier de points proportionnels. Dans cette expérimentation, notre représentation propose un fond de carte minimaliste afin d'éviter à la fois la saturation d'information optique, topographique et graphique. L'île est représentée par l'intermédiaire d'un fond gris (neutre) auquel est appliqué un relief utilisant la méthode Tanaka (***1950***). Le réseau routier est visible ainsi que quelques toponymes.

Comme pour les **carte #3 et #4, la figure #6** affiche les dommages causés à la suite du séisme de Haïti en 2010. Elle est réalisée par l'UNOSAT. Pour ce cas particulier, le format de notre expérimentation a exigé un découpage partiel de l'image. Les dommages sont représentés par une méthode d'interpolation qui ne montre pas les valeurs nulles. Les dommages se s'établissent sur une échelle d'intensité étalonnée du : « substantiel à très fort », « très fort » et « détruit ». Cette représentation est donc uniquement qualitative. Le fond de carte diffère également puisqu'il se compose d'un fond topographique type *Open Street Map*. Il se structure à partir d'éléments tels que le réseau routier, l'emprise de l'habitation, les espaces verts, etc.

Utilisateurs mis à l'étude :

Cette expérimentation a bénéficié d'un contexte favorable à la diversité des participants. L'échantillon est constitué de 85 personnes, dont une minorité de femmes (24%) et une majorité d'hommes (76%). L'âge moyen est de 41 ans. Les plus âgées avaient entre 53 et 64 ans, les plus jeunes entre 22 et 27 ans. En amont de l'expérimentation, il a été demandé aux participants de remplir les questions dédiées au profilage des utilisateurs (PU). Cette étape a permis de formaliser leur niveau de connaissance cartographique (pratique de lecture) et d'en estimer l'influence sur l'expérience de l'utilisateur. Ces données ont permis d'apprécier l'évocation de la carte des dommages pour les participants en lien à leurs « affordances » (itération avec l'objet donnant lieu à une expérience cumulative. Les volontaires étaient issus de milieux professionnels différents. Leur niveau en cartographie était tout aussi varié impliquant ainsi une lecture distincte des cartes (cf. infra).

Les contraintes visuelles étaient minimes au sein de l'échantillon. Elles représentent 12% des participants avec pour principale difficulté, la vue (7%). 5% des personnes enquêtées présentent des problématiques liées à la perception des couleurs. Ce taux relativement faible assure ainsi une fiabilité des résultats fournis par l'ensemble des participants.

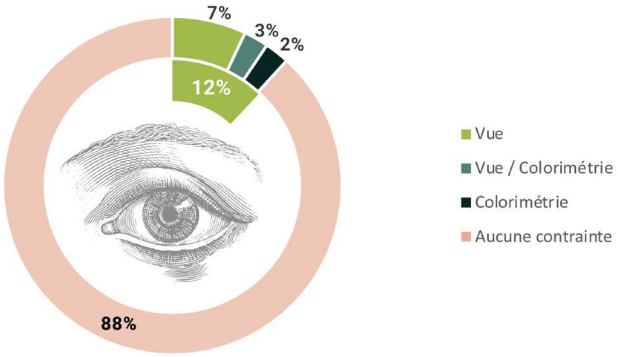


Figure 85 : Contraintes visuelles déclarées par les participants de l'expérimentation #2

Les tâches à accomplir :

Une fois ces éléments informatifs complétés, a été lancé la phase active décomposée en six tâches (Figure 86). Ces tâches consistaient à des actions d'observation et de mémorisation de la carte. Pour chacune des cartes, l'enquête a commencé par une question d'échauffement (*introduction*) qui n'était pas destinée à être incluse dans l'analyse (T1). Une seconde question a permis de tester le niveau d'affinité et de compréhension (*compréhension*) des techniques utilisées pour représenter les dommages (T2). Ces deux tâches faisaient référence aux questions sur la symbologie et la sémiologie (quoi et comment ?). Sont ensuite venues les tâches (T3) de localisation (cf. la taxonomie de ***Munzner, 2014***) divisées en deux sous-ensembles : l'identification des secteurs les plus touchés (T3.1) et des moins touchées (T3.2). Il s'agit de questions sur l'espace (où ?) et sur la facilité avec laquelle l'information demandée peut être localisée (*localisation*).

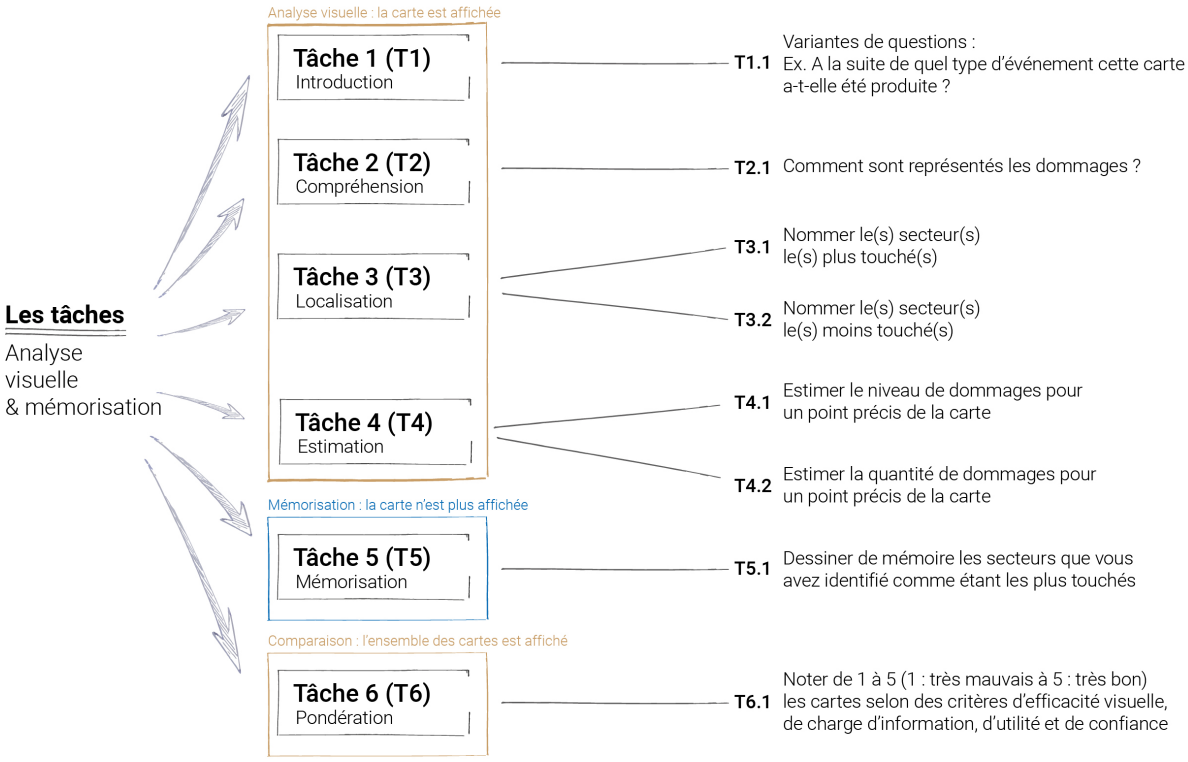


Figure 86 : Liste des tâches à accomplir lors de l'expérimentation #2

Le questionnaire s'est poursuivi par des tâches d'estimation (*estimation*) en T4 divisées en deux tâches qui concernent l'évaluation du niveau de dommages pour un point précis de la carte (T4.1) et l'estimation de la quantité de bâtiments touchés que l'on y observe (T4.2). La tâche T5 a consisté à dessiner de mémoire les secteurs identifiés comme étant les plus touchés lors de la phase d'analyse visuelle (*mémorisation*). Cette tâche a été réalisée par le biais d'un carton dédié à la trace graphique. Ce carton y présente la zone visionnée précédemment par l'intermédiaire d'un cadre aux contours rouge sur un fond de carte neutre, sans toponymes. Cette tâche fait écho à la dimension de mémoire à court terme (de travail) et à long terme. Ce schéma mental est réalisé dans les interludes qui font suite au visionnage d'une carte. Cette tâche a ainsi permis de voir comment les informations thématiques sont retenues et transcrites, pour ensuite les confronter à leur modèle d'origine. Une dernière tâche (T6) a interrogé le participant sur ses préférences cartographiques (*pondération*) selon plusieurs critères à pondérer de 1 (très mauvais) à 5 (très bon). Ces critères prennent en compte :

- L'efficacité visuelle : Il s'agit de mesurer l'efficacité visuelle de la technique afin de répondre aux tâches concernant l'analyse des dommages.
- La charge d'information : Il s'agit de mesurer la quantité d'informations présente sur la carte et de savoir si elle est trop importante, suffisante ou insuffisante.
- L'utilité des informations en arrière-plan : Il s'agit de déterminer l'intérêt des données affichées sur le fond de carte.
- Le niveau de certitude : Il s'agit d'estimer le niveau de certitude du participant à avoir bien répondu aux tâches pour les différentes cartes présentées.

En ayant conscience que les cartes ne sont sans doute pas équivalentes dans la manière d'être traitées par le cerveau (**Fabrikant et al. 2008**), nous devrions mesurer l'efficacité d'une carte par le taux de bonne réponse et la durée de réponse (**Kinkeldey et al. 2014**). Ce dernier a été toutefois difficile à mesurer compte tenu de la configuration de l'atelier (en amphithéâtre) et du nombre de personnes présentes. Il s'agira donc d'une des limites du test. L'ensemble de ces tâches est intégré dans un questionnaire (cf. Annexe 4) composé de 14 pages *recto verso*. Les tâches d'observation ont été placées au *recto* et la tâche de mémorisation au *verso* afin de ne pas biaiser le test.

La procédure :

L'atelier a été organisé dans le cadre d'un colloque. Le nombre important de participants en simultané a contraint le cadre de l'expérimentation à un amphithéâtre. Une phase introductive a été dédiée à la présentation des démarches et des objectifs du projet. Elle a également servi à l'explication du protocole, des différentes phases et de leurs durées.

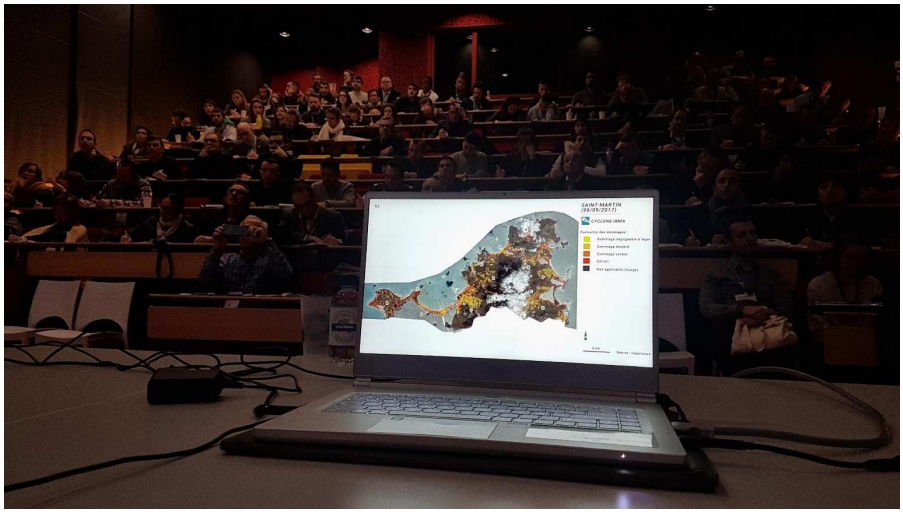


Figure 87 : Lieu de réception des participants et configuration (clichés Candela, 2020)

Cette étape a été suivie par la distribution du questionnaire. Les participants ont disposé de 15 minutes pour remplir le talon de l'enquête. En suivant le même principe que pour l'expérimentation #1 (cf. supra 6.1.2), les cartes ont été diffusées aléatoirement afin d'éviter la redondance cognitive liée à la similitude de deux des secteurs présentés (Baie de Port-au-Prince et Saint-Martin) (étape #1). Lors de cette phase active, la réalisation des tâches pour une carte a été fixée à 5 minutes. Ce laps de temps a été décomposé en deux périodes :

- La réponse à des questions en ayant la carte affichée : durée de 4 minutes
- La réponse à une tâche en ayant plus la carte affichée : durée de 1 minute

Ainsi, lors de cette phase active, chaque personne a analysé et traité les données de 6 techniques visuelles différentes durant 30 minutes environ. À l'issue de cette étape, les participants ont répondu à la dernière partie du questionnaire. Cette dernière concernait la comparaison des cartes et leur notation selon plusieurs critères (étape #2). Ces processus sont synthétisés dans la Figure 88.

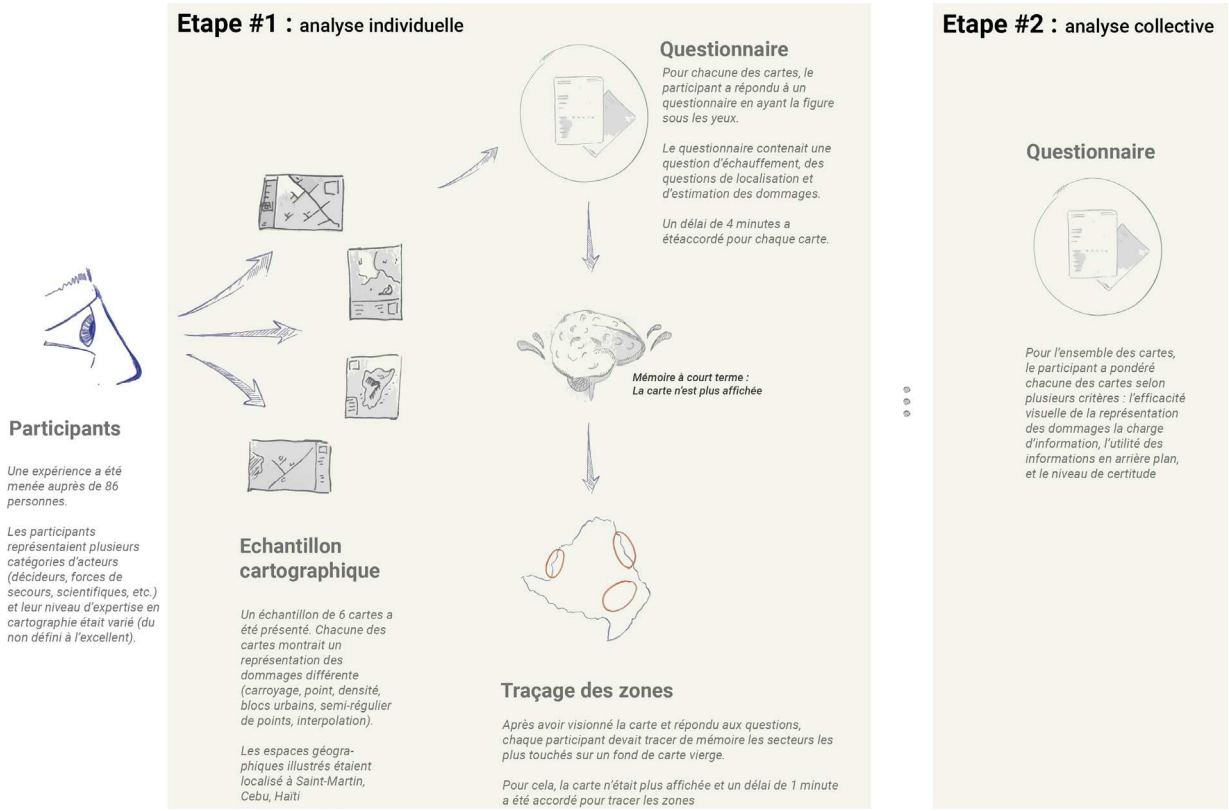


Figure 88 : Synthèse de la procédure de la phase active de l'expérimentation #2

9.1.2. *Traitement et exploitation des résultats de l'expérimentation #2*

Base de données et traitement des réponses aux questionnaires :

85 questionnaires ont été récupérés sur les 6 cartes testées, soit 510 analyses visuelles intégrées dans une base de données. Cette dernière est composée de plusieurs feuilles correspondantes aux différentes parties que l'on retrouve dans le questionnaire : *talon de l'enquête ; tâche à accomplir (carte #1, carte #2, carte #3, carte #4, carte #5, carte #6) ; synthèse des préférences basée sur des critères spécifiques.*

Le questionnaire contenait des questions ouvertes et fermées. Concernant les questions ouvertes, il y avait deux types de réponses à traiter : *les réponses du talon de l'enquête qui laissent libre cours à l'expression du participant et les réponses des tâches à accomplir qui se basent sur une série de toponymes à citer (T3).* Une première phase a été dédiée à l'analyse et à la classification des réponses aux questions ouvertes obtenues grâce au talon de l'enquête. Cette classification a été réalisée sur la base de l'itération de certains mots clefs : crise, communication, intervention, etc. appartenant aux champs lexicaux de la gestion des risques, des crises, de l'enseignement et autres. Ce travail a abouti à une classification de premier ordre : classification générale qui tente de regrouper les réponses grâce à des termes généraux ; et une classification de second ordre : qui permet d'affiner certaines réponses en fonction de sous-groupes en se fondant également sur l'itération de certains mots clefs. Le Tableau 12 en fournit un exemple.

Tableau 12 : Exemple de classification de 1er ordre et de second ordre à partir de réponses ouvertes

Nom / Prénom	Catégorie :	Usage métier : 1er ordre	Usage métier : 2d ordre
John Doe	Force de secours	Opérationnel	Gestion de crise / retour à la normale
Marie Currie	Décideurs	Étude des risques	Prévention / Communication

Une fois standardisées dans la base de données, ces données ont servi à établir le profilage des participants en fonction des catégories d'acteurs, des niveaux de connaissance en cartographie et des usages de la carte.

Concernant les réponses fermées des tâches T3, ces dernières ne donnaient pas explicitement un nombre limite de réponses, bien qu'il y ait un nombre attendu de réponses pour chaque carte. En fonction du nombre de réponses données par rapport au nombre de réponses attendues nous avons obtenu un ratio de bonnes réponses et de mauvaises réponses dont le cumul excède 100%.

Récolte et interprétation de la tâche de mémorisation :

Les zones mémorisées et dessinées par les 85 participants ont été retranscrites sous SIG par nos soins (Figure 89). En tout, ce sont 510 couches comportant 1755 entités surfaciques qui ont été vectorisées. Le « nom » et le « prénom » du participant à l'origine de la ou des zone(s) vectorisée(s) ont été intégrés dans une table attributaire comme identifiant permettant l'individualisation des vecteurs. Cette méthode a été employée afin d'y rattacher cartographiquement les paramètres du profil des participants (catégorie et niveau cartographique) par le biais d'une jointure attributaire. Elle offre ainsi la possibilité d'étudier par exemple le niveau de connaissance en cartographie des utilisateurs et les taux de mémorisation d'une représentation.

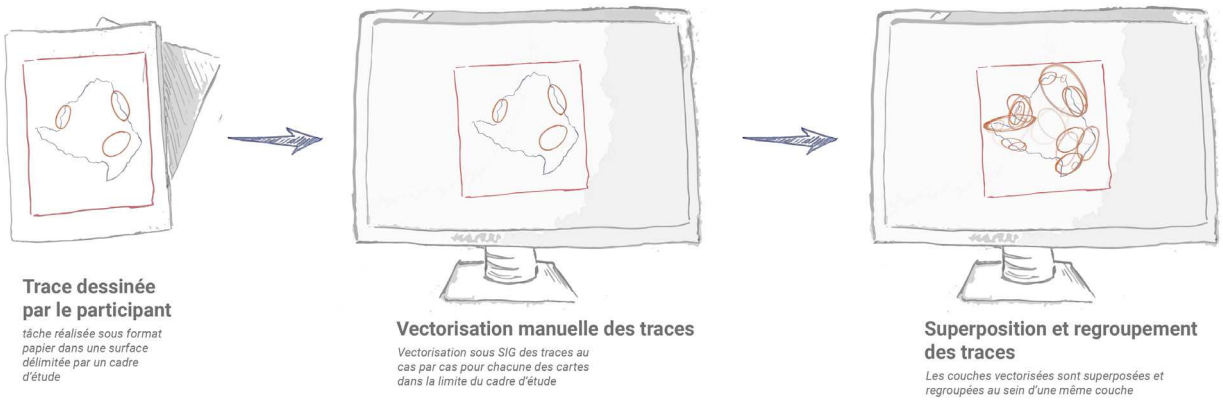


Figure 89 : De la trace papier à la trace numérique

Nous avons utilisé le même procédé que l'expérimentation #1 antérieure (cf. supra 6.1.3) pour exploiter ces surfaces mémorisées. Les couches ont été regroupées sous SIG. Les surfaces superposées ont été traitées par l'intermédiaire d'une grille régulière hexagonale dont les dimensions varient en fonction des échelles cartographiques de notre échantillon. Elles sont respectivement de 200*200 mètres pour les cartes [1 ; 2 ; 3 ; 5] et de 100*100 mètres pour les cartes [4 ; 6]. L'intersection réalisée entre les couches et la grille a permis de calculer un pourcentage de citations par maille. Cette approche a permis d'estimer les secteurs qui ont été cités le plus de fois par les 85 participants et de spatialiser ce que nous appellerons la « mémoire collective ».

Comparaison avec les secteurs les plus touchés :

Cette mémoire collective, déclinée par la suite entre les catégories d'acteurs et les niveaux cartographiques, a été confrontée aux informations de la carte d'origine. Pour cela, les secteurs correspondant aux zones les plus touchées ont été vectorisés pour chaque carte. Puis, les zones les plus touchées ont été intersectées avec la grille utilisée pour recenser la mémoire collective. La seule différence avec la méthode précédente réside dans l'absence de superposition entre les zones vectorisées lors de ce processus. Le décompte des centroïdes par maille ne récupère ainsi qu'une information binaire : [0] pour les secteurs qui ne sont pas touchés et [1] pour les secteurs touchés. En comparant les différents seuils de mémorisation et les secteurs les plus touchés, nous avons pu déduire les taux de mémorisation correcte par carte. Cette approche permet d'apprécier les effets des six représentations cartographiques sur l'acquisition et la sauvegarde des informations à court terme par les différents participants.

9.2. Résultats de l'expérimentation #2

9.2.1. *Profil des participants*

Catégorie d'acteurs et niveaux cartographiques

- **Catégorie d'acteurs :**

Comme précisé plus haut, l'atelier expérimental a réuni 85 personnes, issues de milieux professionnels différents. À noter que les acteurs publics (collectivité territoriale, Syndicat mixte, EPTB, etc.) ont été dissociés des scientifiques dans le traitement des résultats, car ces derniers n'ont pas les mêmes rôles et les mêmes objectifs. 40% des participants appartiennent au secteur privé. Les 60% restant se déclinent entre des acteurs publics (12%) ; des membres des forces de secours (13%) ; des scientifiques (14%) ; des étudiants (15%) et pour finir des participants « autres » (6%) qui n'ont pas répondu à la question (Figure 90).

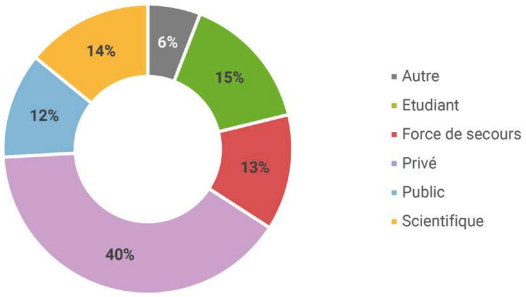


Figure 90 : Part en pourcentage des différentes catégories d'acteurs participants (expérimentation #2)

La part importante que représentent les acteurs privés recouvre une variété de cœur de métier (Figure 91).

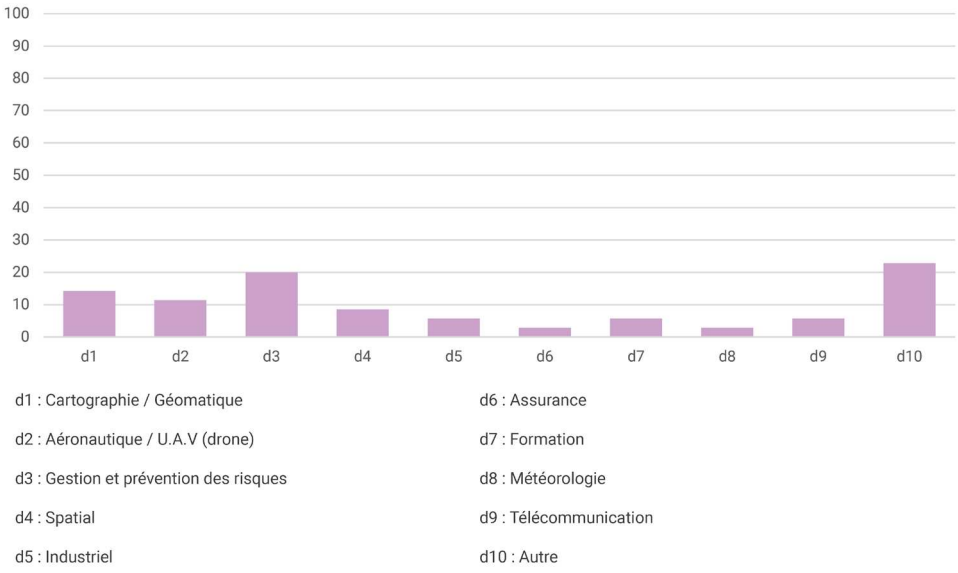


Figure 91 : Détail de la catégorie privé (x) en pourcentage (y) (expérimentation #2)

20% d'entre eux opèrent dans la gestion et la prévention des risques (**d3**), notamment au sein de bureaux d'études spécialisés. 14% sont cartographes ou géomaticiens (**d1**). 11% travaillent dans le milieu de l'aéronautique et de l'U.A.V., *c.-à-d.* des drones (**d2**). Les autres se répartissent entre plusieurs domaines : le spatial (**d4**) à 8.5% ; l'industriel (**d5**), la formation (**d7**) et les télécommunications (**d9**) à 6% ; l'assurance (**d6**) et la météorologie (**d8**) à 3%.

- **<u>Niveau cartographique :</u>**

Le niveau des participants est assez varié. Il faut noter cependant que plus de la moitié, soit 58% de l'échantillon, dispose d'un niveau allant du « bon » (45%) à « l'excellent » (13%). Pour les 42% restant, 19% se considèrent comme « novice » et 17% comme ayant un niveau « suffisant ». 6% de l'échantillon a un niveau « non défini ».

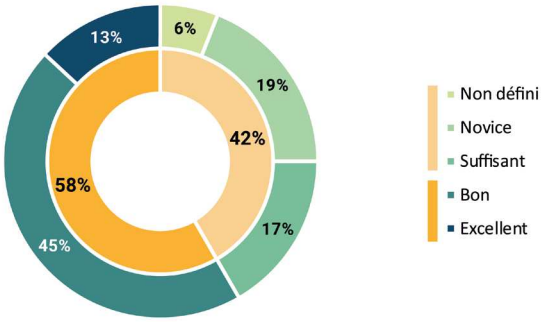
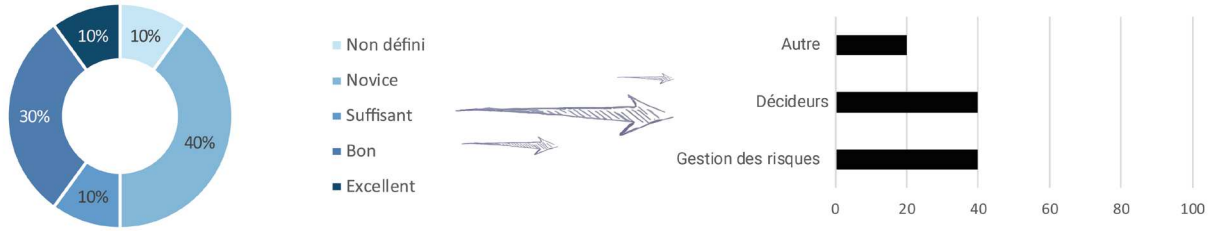


Figure 92 : Niveau cartographique des participants (expérimentation #2)

Ces connaissances cartographiques sont détaillées par catégorie d'acteur. 40% des acteurs publics sont « novices » en la matière. En considérant le niveau « non défini », 50% de l'échantillon public a un niveau inférieur à « suffisant » contre 40% ayant un niveau supérieur à « suffisant ». Les 10% restants sont attribués à un niveau intermédiaire (Figure 93, 1a).



(1a) Niveau cartographique sur l'échantillon «acteurs publics»

(1b) Type «d'acteurs publics»

Figure 93 : Niveau cartographique des acteurs publics (expérimentation #2)

À noter que parmi les acteurs publics, les décideurs et les gestionnaires des risques sont représentés à parts égales, soit 40% (Figure 93, 1b). En prenant en compte ces sous-ensembles (Figure 94, 1c), 40% des « décideurs locaux/institutionnels » et « autres » ont un niveau « bon » a minima.

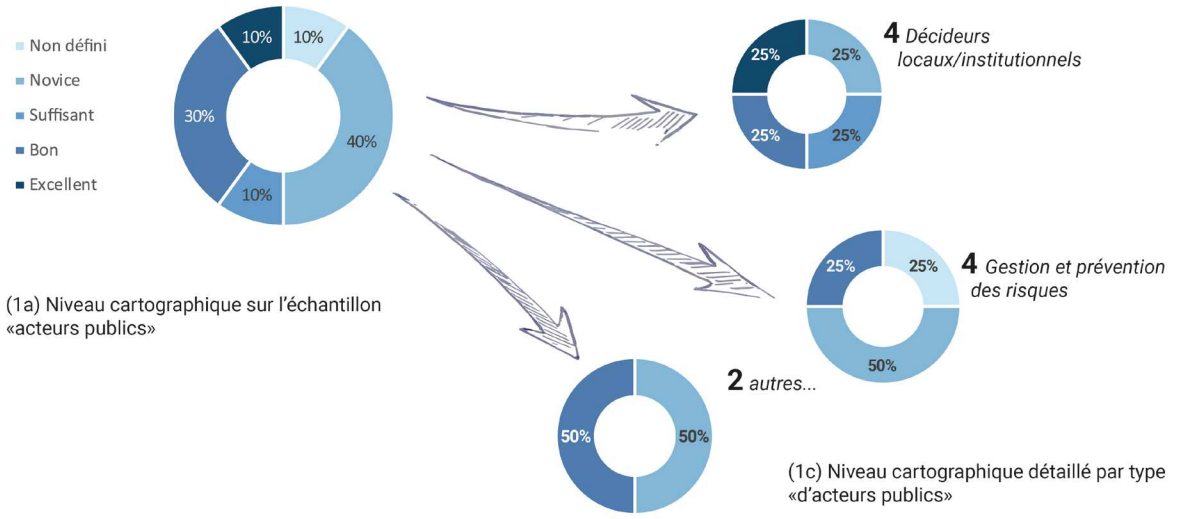


Figure 94 : Part en pourcentage du niveau cartographique des acteurs publics (1a) et détaillés aux sous-ensembles (1c) (expérimentation #2)

Les acteurs privés possèdent un niveau en cartographie tout aussi varié. Toutefois, 53% de l'échantillon a un niveau « bon » (38%) et « excellent » (15%). *A contrario*, 41% ont un niveau inférieur à « suffisant », dont 26% qui se considéraient comme « novice » en la matière et 15% ne pouvant le définir. Les niveaux « suffisants » ne représentent que 6% des acteurs privés (Figure 95, 1a).

La grande variété des acteurs privés influence sans aucun doute le niveau d'expertise en cartographie de cette catégorie (Figure 95, 1b). Par exemple, 100% des cartographes et géomaticiens considèrent comme avoir un niveau « bon » *a minima*. 20% possèdent un niveau « excellent ». Les ingénieurs qui œuvrent dans la gestion et la prévention des risques au sein des bureaux d'études ont également une bonne connaissance cartographique. 57% considèrent avoir un niveau « bon » et 43% un niveau « excellent ». Ces participants, par leurs activités, sont plus enclins à manipuler des produits cartographiques, à les produire, voir même à les enseigner comme c'est le cas pour les activités de formation. Les bureaux d'études en gestion des risques peuvent produire des cartographies à usage opérationnel pour les PCS (Plans Communaux de Sauvegarde) ou encore dans les études de risques (PPR, diagnostic de vulnérabilité, etc.).

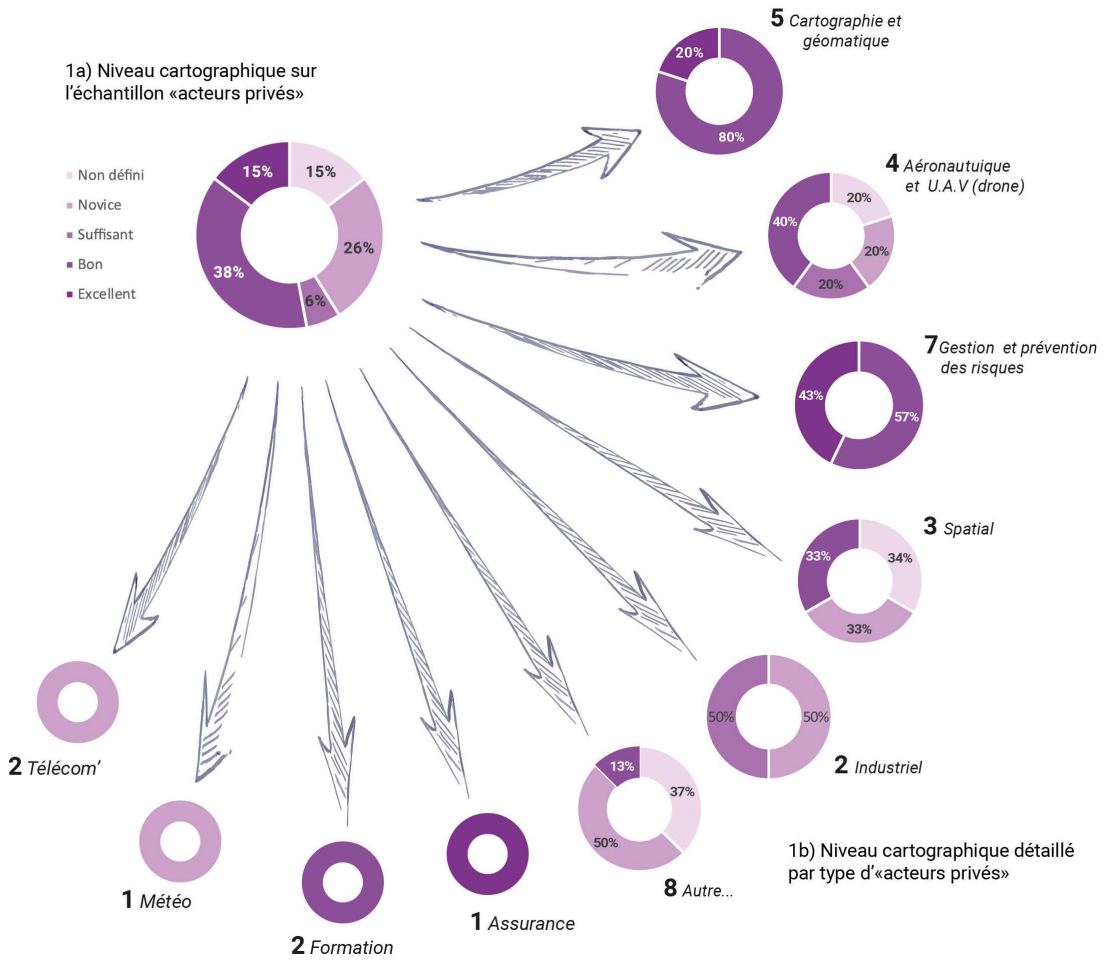


Figure 95 : Part en pourcentage du niveau cartographique des acteurs privés (1a) détaillé au sous-ensemble de la catégorie (1b) (expérimentation #2)

Pour les autres secteurs d'activité du privé, les niveaux en cartographie sont plus variables. Les participants travaillant dans le secteur de l'aéronautique et des drones considèrent avoir un niveau « bon » pour 40% d'entre eux. Niveau que l'on retrouve pour 33% des personnes opérant dans le spatial. Les industriels ont un niveau « suffisant » et « novice » à parts égales (50%). Les personnes œuvrant dans le domaine de la télécommunication et de la météo considèrent avoir un niveau « novice ». Au vu du faible nombre de représentants de chacun de ces sous-ensembles, il est difficile de dire à ce stade si le niveau de cartographie est caractéristique des activités. De manière générale, il semble qu'une part importante (41%) est moins à l'aise avec les représentations cartographiques et qu'une part tout aussi importante (53%) à l'habitude de ces produits.

Concernant les forces de secours, le niveau cartographique est « bon » pour 73% de l'effectif. 18% ont un niveau « excellent » et seulement 9% un niveau « suffisant ». Les niveaux « novice » et « non défini » sont inexistants (Figure 96). Ces niveaux sont liés à l'usage prépondérant de la cartographie dans le domaine de la sécurité civile. Notons cependant que ces cartes privilégient des représentations opérationnelles dont les éléments visuels sont très spécifiques et utilisent des codes standardisés, notamment dans la construction des éléments de légendes.

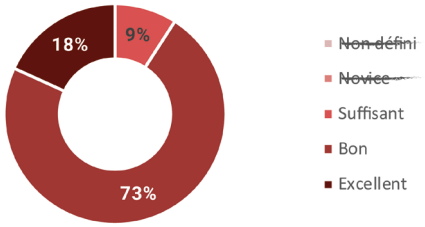


Figure 96 : Niveau cartographique des forces de secours (expérimentation #2)

Le niveau cartographique est hétérogène pour les scientifiques. Ils considèrent avoir un niveau « excellent » à 8%, « bon » à 50%, « suffisant » à 25% et « novice » à 17% (Figure 97). 58% de l'échantillon a donc un niveau supérieur à « suffisant » contre 42% ayant un niveau inférieur. Le niveau cartographique dépend principalement des activités du chercheur et de son besoin d'outil en analyse spatiale.

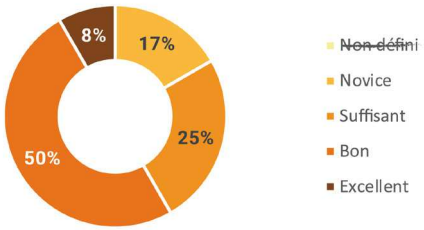


Figure 97 : Niveau cartographique des scientifiques (expérimentation #2)

Les étudiants considèrent avoir un niveau majoritairement « bon » (54%), voir « excellent » (8%). 38% considèrent avoir un niveau « suffisant » (Figure 98). Ces chiffres sont directement liés à la formation universitaire des étudiants qui ont assisté au colloque. Une part importante d'entre eux semble bénéficier d'une bonne formation en cartographie voire en SIG.

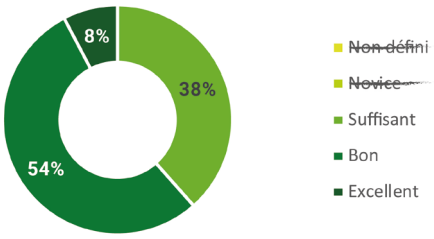


Figure 98 : Niveau cartographique des étudiants (expérimentation #2)

40% des participants « autres » définissent leur niveau comme « bon » et « excellent » à 20%. Les 60% restant ont un niveau égal (40%) ou inférieur (20%) (Figure 99).

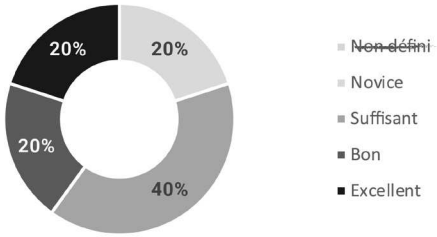


Figure 99 : Niveau cartographique des participants autres (expérimentation #2)

Usage métier de la cartographie et perception des cartes de dommages *post*-catastrophes

- **<u>Usage métier de la cartographie au sein des participants :</u>**

Pour rappel, il s'agissait d'une question ouverte laissant libre cours à l'expression des participants. Le regroupement par mots clefs a permis de définir les catégories suivantes :

- **Information / prévention :** Cette catégorie regroupe les usages concernant la prévention du risque et l'information des populations. Il s'agit de la valorisation, la vulgarisation de contenus techniques, scientifiques vers un public non spécialisé.
- **Utilitaire :** Comprend un usage qui n'est pas forcément professionnel. Il peut être pratiqué dans la vie courante (Calcul d'itinéraire routier, randonnée, etc.) notamment par l'usage de plateforme comme Google map, les cartes IGN, etc.
- **Statistique :** Les cartes statistiques sont utilisées pour représenter des phénomènes non tangibles, des informations thématiques (économie, indicateur social, etc.) à des échelles variées (nationale, régionale, locale, etc.).
- **Recherche :** L'usage de la cartographie dans un domaine scientifique est varié. Il peut s'agir d'un outil d'analyse spatiale ou bien d'illustration de résultats. Elle peut faire l'objet d'une spécialité (compétence) ou non du chercheur ; ce qui explique les niveaux observés précédemment.
- **Formation / enseignement :** Cités comme tels par les participants, ces termes font directement référence à la pratique universitaire ou d'organismes de formation spécialisés dans l'usage et la pratique cartographique.
- **Production cartographique / de données :** Cette catégorie fait référence à la création de données et leur exploitation dans la réalisation cartographique. Elle regroupe des termes comme : production de données ou de cartes, comparaison avec des orthophotos, SIG, traitement de données spatiales, administration de données géographiques, etc.
- **Aide à la décision :** Le terme « aide à la décision » fait écho à la notion de pratique cartographique servant à analyser spatialement une situation, une localisation et prendre une décision en connaissance de cause.
- **Opérationnel :** Les citations regroupent des termes telles que situation tactique, planification, intervention, opérations, etc., mais également l'emploi de termes comme "cartes actions" intégrées généralement aux PCS, ou encore le terme « gestion de crise ».
- **Étude des risques :** L'étude des risques est un regroupement des termes comme études, analyses, enjeux, aléa, exposition, relevés de laisses de crues, modélisation, cartographies des risques. Ces termes concernent les études *a priori*.

Cette classification a permis d'observer certaines tendances dans l'usage qui est fait des supports cartographiques. Les études de risques se retrouvent en toute première position. Elles sont suivies par les notions d'opérationnalité et d'aide à la décision puis par la production cartographique ou de données (Figure 100). Ces modalités préfigurent une utilisation thématique de la cartographie, celle de la gestion des risques et des crises. En second plan, nous retrouvons la formation et l'enseignement, la recherche, les statistiques, l'utilitaire et l'information préventive.

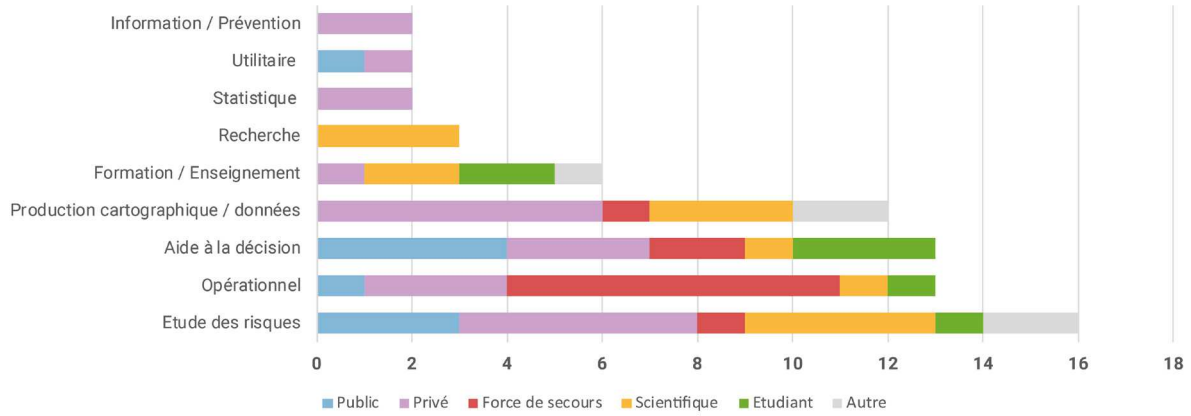


Figure 100 : Nombre de citations des usages de la cartographie détaillée par catégorie d'acteurs (expérimentation #2)

Afin de savoir à qui étaient rattachés ces différents usages, les réponses ont été détaillées par catégories d'acteurs (Figure 100). Sans surprise, les forces de secours ont un usage très opérationnel de la cartographie, intégrée à des fins d'interventions et d'actions sur le terrain. La production est peu présente tout comme l'étude de risque. Pour les acteurs publics, la carte est principalement un outil d'aide à la décision et d'étude de risques. Dans une moindre mesure, elle est mobilisée pour l'opérationnel et l'utilitaire. Cette pratique se caractérise donc par un usage cartographique placé en amont (*étude a priori*) et en aval (*retour d'expérience a posteriori*) d'une crise avec aucune production de données ou de cartes. Les acteurs privés, quant à eux, semblent privilégier la production de données et la réalisation de cartes notamment dans les études de risques. La carte est également utilisée pour l'aide à la décision et l'opérationnel, puis à des fins de prévention, d'études statistiques, d'utilitaire et de formation/enseignement. Leur profil est plus polyvalent. En effet, ils sont à la fois producteurs, utilisateurs et distributeurs des produits cartographiques.

Pour les scientifiques, les usages sont tournés vers l'étude des risques, la production de données et directement la recherche. Citons également la formation, l'aide à la décision puis l'opérationnel. Ce sont principalement des profils orientés vers des domaines de recherche spécifiques à la gestion des risques et des crises. Ils collectent des données et les traduisent cartographiquement. Les étudiants semblent privilégier la cartographie comme outil d'aide à la décision. Nous retrouvons également l'usage de la carte dans l'enseignement et la formation, ce qui est directement lié à leur statut. L'étude des risques et l'opérationnel sont relégués au second plan. Pour la catégorie « autre », la pratique cartographique sert principalement l'étude des risques, la collecte de données et la production.

Ainsi, ces observations ont montré que pour chaque profil décrit ci-dessus correspondait une pratique différente de la cartographie. Ces usages intrinsèques à la profession des participants ont notamment influencé la perception des usages de la carte de dommages *post*-catastrophes.

- **<u>La perception des usages des cartes de dommages *post*-catastrophes :</u>**

La perception des usages des cartes de dommages est introduite par la question suivante : *selon vous, quels sont les principaux usages des produits cartographiques diffusés par les services de cartographies rapides ?* Le recueil des réponses a également été soumis à une analyse textuelle. Elle a permis la classification suivante :

- **Localisation :** Ce terme regroupe les citations mentionnant la localisation des enjeux, les repères topographiques et les points d'intérêts. Il s'agit de se repérer dans l'espace.
- **Prévention :** La prévention regroupe les termes de prévision, prévention des risques ou encore d'anticipation. Ce sont donc les actions menées en amont afin de prévenir et réduire l'impact de la catastrophe.
- **Indemnisation :** L'indemnisation concerne les actions menées *post*-catastrophes afin d'estimer le coût de l'événement et les mesures compensatoires.
- **Information/Communication :** Ces termes regroupent tout ce qui réfère à la communication situationnelle, les échanges rapides en temps de crise et l'information distribuée à la population pour sa sauvegarde dans le cadre de mesures telles que les évacuations.
- **Coordination/intervention :** Ces termes sont affiliés aux processus et actions enclenchés en amont, pendant et après une catastrophe. On retrouve par exemple, la coordination et la planification des opérations de secours, la mise en sécurité des populations ou encore l'évacuation.
- **Évaluation :** Il s'agit des termes relevant de l'estimation des dégâts, du diagnostic réalisé à partir des images *post*-catastrophes. Cela prend également en compte les termes liés à la modélisation des aléas permettant l'évaluation des conséquences a priori, mais aussi de la reconstruction *a posteriori*.
- **Aide à la décision :** L'aide à la décision regroupe également les termes affiliés à la hiérarchisation des tâches et actions, à une vision situationnelle permettant d'anticiper les prises de décisions.

Les citations désignant les tâches d'évaluation ont été les plus nombreuses (Figure 101). En seconde position, nous retrouvons la coordination et l'intervention puis l'aide à la décision. La carte sert de support aux différents opérateurs de la gestion des risques et des crises. Les usages de la carte recensés comme outil d'information/communication, de prévention, de localisation et d'indemnisation sont moins importants. Il convient donc de noter que l'ensemble de ces termes ne dénote pas avec l'usage principal de ces cartes. En effet, l'évaluation des dommages permet la prise de décision et servira à aiguiller les actions sur le terrain. La diversité des acteurs opérant durant la gestion de crise oblige un certain nombre de communications et d'échanges d'informations qui relèvent d'un caractère spatial. Par nature, la carte permet de se repérer dans l'espace.

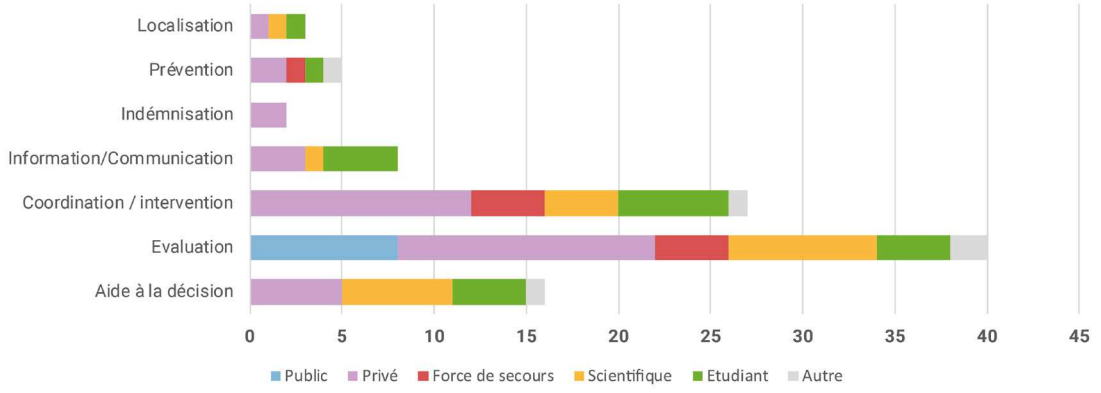


Figure 101 : Nombre de citations des usages des cartes de dommages détaillés par catégorie d'acteurs (expérimentation #2)

À l'instar des usages métiers, certaines tendances sont corrélées aux catégories d'acteurs expérimentées. Encore une fois, les réponses des forces de secours sont très représentatives de leur cœur de métier. Les cartes post-catastrophes servent à évaluer la situation et à coordonner les actions.

Ce constat est le même pour les acteurs privés avec toutefois des éléments complémentaires comme l'aide à la décision, l'information ou encore l'indemnisation. Pour les acteurs publics, les réponses sont exclusivement centrées sur l'évaluation des dommages. Les chercheurs voient la carte *post*-catastrophe comme un outil d'évaluation des dommages et qui sert également à la prise de décision et la coordination des interventions. Dans une moindre mesure, on retrouve la carte comme outil de communication et d'information. *A contrario*, les étudiants semblent porter plus d'importance à cet usage.

- **<u>Préférences des supports cartographiques</u>**

La préférence des supports cartographique permet d'apprécier la place de la cartographie statique vis-à-vis des supports dynamiques. Ces derniers sont privilégiés par les participants dans 60% des cas (Figure 102). Ces supports sont composés des supports numériques interactifs (31%) et adaptables (29%).

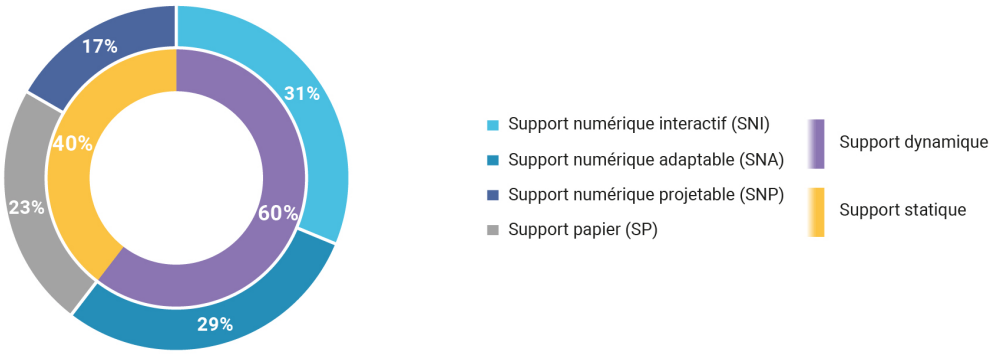


Figure 102 : Répartition par type de support cartographique (expérimentation #2)

Les supports statiques représentent 40% des réponses. On retrouve parmi eux le support papier (23%) et le support numérique projetable (17%). Ce dernier regroupe les formats numériques de type PDF, PPT projetable, mais non modulable. Malgré la part importante des supports numériques dynamiques, il faut noter que le support papier représente une part non négligeable des réponses. À 23% contre 31% pour les supports numériques interactifs, le faible écart montre bien que la carte papier est encore très utilisée, et ceci sans véritables tendances notables en fonction des catégories d'acteurs (Figure 103).

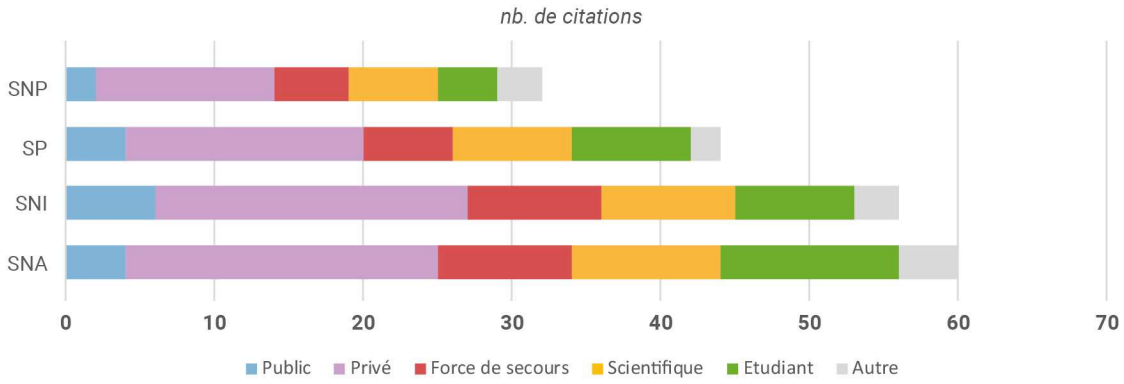


Figure 103 : Support cartographique privilégié détaillé par catégorie d'acteurs (expérimentation #2)

9.2.2. *Résultats de la phase d'analyse visuelle*

La phase active de cette expérimentation est divisée en deux parties. La première a consisté à l'analyse visuelle de six cartes des dommages (Figure 104). Elle-même était scindée en deux tâches principales *: la localisation générale des secteurs les plus touchés (T3.1) et ceux qui l'étaient le moins (T3.2) ; l'estimation du niveau de dommage (T4.1) et la quantité de bâtiments concernés (T4.2) à un point précis.* Pour répondre à ces questions, les participants se sont servis de toponymes rajoutés manuellement par nos soins sur les différentes cartes. La seconde partie visait à reproduire de mémoire, sur un fond de carte vierge, la localisation des secteurs les plus touchés.

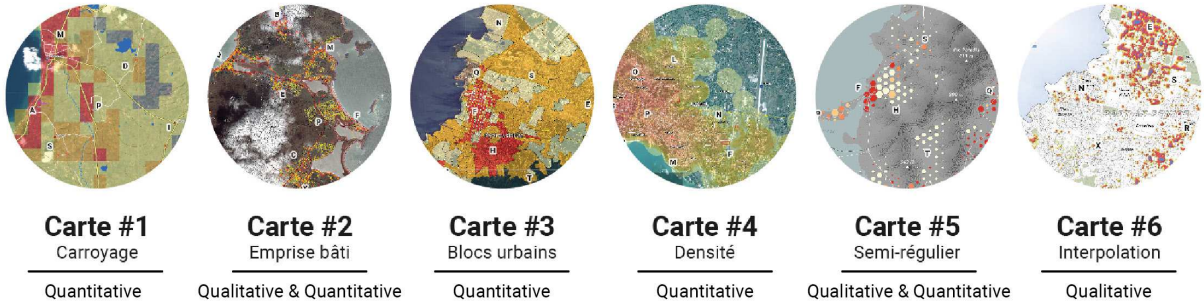


Figure 104 : Rappel des représentations cartographiques utilisées pour l'expérimentation #2

Analyse visuelle : appréciation synoptique de la donnée

- **<u>Tâche 3.1 - Localiser les secteurs les plus touchés :</u>**

Les résultats de la tâche 3.1 (*localisation des secteurs les plus touchés*) sont confrontés avec les réponses attendues de chaque carte. Ces dernières ont été définies par des chercheurs thématiciens du LAGAM *a priori* à partir des données brutes. Rappelons que les questions étant ouvertes et sans limites du nombre de réponses à fournir. Ainsi, pour chaque représentation des dommages (Figure 105) les pourcentages cumulés excèdent 100%. Nous analysons le pourcentage de réponses obtenues vis-à-vis des réponses attendues.

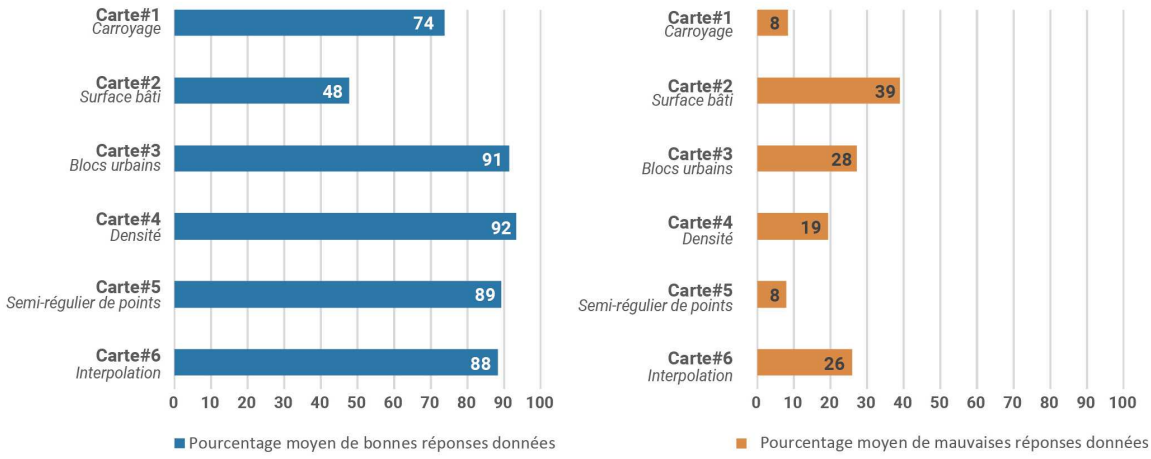


Figure 105 : Pourcentage moyen de bonnes et mauvaises réponses à la tâche 3.1, localisation des secteurs le plus touchés (expérimentation #2)

Les cartes **#4** (92%), **#3** (91%), **#5** (89%) et **#6** (88%) fournissent respectivement les meilleurs pourcentages de bonnes réponses. Elles sont suivies des cartes **#1** et **#2** avec respectivement 74% et 48% de bonnes réponses en moyenne. Les cartes **#1** et **#5** sont sujettes à moins d'erreurs (8% chacune) tandis que les cartes **#3** et **#6** présentent des taux supérieurs à 25%. La carte **#2** se démarque par un taux moyen de bonnes réponses inférieures à 50%. Cette représentation obtient également le pourcentage plus élevé de mauvaises réponses (39%).

Pour comprendre ces résultats, il faut rappeler que la carte **#2** est la seule carte qui ne regroupe pas l'information au moyen d'une méthode d'agrégation statistique. Elle conserve une représentation du dommage à l'emprise individuelle du bâti (Figure 104). Au regard des résultats (Figure 105), cette technique parait pour autant plus difficile à être interprétée lors d'une approche synoptique. La part de mauvaises réponses est en effet plus importante, quels que soient le niveau cartographique et le type de catégorie des participants (Tableau 13). *A contrario* les cartes **#1** et **#5** sont moins sujettes aux mauvaises réponses.

Tableau 13 : Pourcentage moyen de bonnes réponses (T3.1-1) et de mauvaises réponses (T3.1-2) par niveau cartographique (a) et par catégorie d'acteurs (b) (expérimentation #2)

	Carte #1		Carte #2		Carte #3		Carte #4		Carte #5		Carte #6	
(a) Nv.	T3.1-1	T3.1-2	T3.1-1	T3.1-2	T3.1-1	T3.1-2	T3.1-1	T3.1-2	T3.1-1	T3.1-2	T3.1-1	T3.1-2
Non défini	**80**	*3*	*34*	**45**	**93**	**27**	**85**	**18**	**90**	*3*	**85**	**21**
Novice	**76**	*8*	**56**	**35**	**98**	**21**	**98**	**18**	**90**	*7*	**89**	**30**
Suffisant	**76**	*12*	*43*	**45**	**93**	**29**	**95**	**24**	**85**	*2*	**93**	**33**
Bon	**66**	*10*	*47*	**36**	**86**	**30**	**97**	**18**	**90**	*12*	**86**	**24**
Excellent	**87,5**	*2*	*48*	**44**	**94**	**29**	**93**	**17**	**91**	*7*	**89**	**24**

(b) Cat.	T3.1-1	T3.1-2	T3.1-1	T3.1-2	T3.1-1	T3.1-2	T3.1-1	T3.1-2	T3.1-1	T3.1-2	T3.1-1	T3.1-2
Privé	**76**	*6*	**50**	**40**	**91**	**27**	**95**	*17*	**91**	*9*	**86**	**21**
Public	**67**	*5*	**57**	**22**	**100**	*15*	**93**	*17*	**92**	*8*	**95**	**23**
Fs.*	**76**	*11,6*	*44*	**35**	**88**	**34**	**95**	**24**	**85**	*11*	**84**	**28**
Sc.*	**73**	*10*	**50**	**35**	**97**	**23**	**100**	**28**	**86**	*3*	**88**	**31**
Étudiant	**66**	*12*	*38*	**52**	**79**	**46**	**92**	*15*	**93**	*9*	**94**	**34**
Autre	**90**	*7*	*43*	**30**	**100**	*10*	**95**	**20**	**77**	*4*	**85**	**35**

*(Fs. : Force de secours & Sc. : Scientifique)

Sur notre échantillon cartographique, les techniques d'agrégation statistique ont eu de meilleurs résultats pour la tâche 3.1. Parmi ces dernières, celles qui utilisent le carroyage (carte **#1**), et le semi-régulier de points proportionnels (carte **#5**) engendrent moins d'erreurs. La carte **#2** qui utilise l'emprise au bâti pour présenter les dommages apparaît moins efficace, quel que soit le niveau cartographique ou la catégorie d'acteurs des participants.

- **<u>Tâche 3.2 - Localiser les secteurs les moins touchés :</u>**

Pour cette tâche, les résultats démontrent que les cartes **#1** et **#2** fournissent en moyenne un pourcentage plus important de mauvaises réponses. Elles sont estimées à 77% et 65% (Figure 106). Avec 78% de réponses correctes, la carte **#1** offre un bilan mitigé. En outre, ce sont les participants ayant un

niveau « excellent » ou encore les « acteurs publics » qui en moyenne ont donné le plus de mauvaises réponses (Tableau 14).

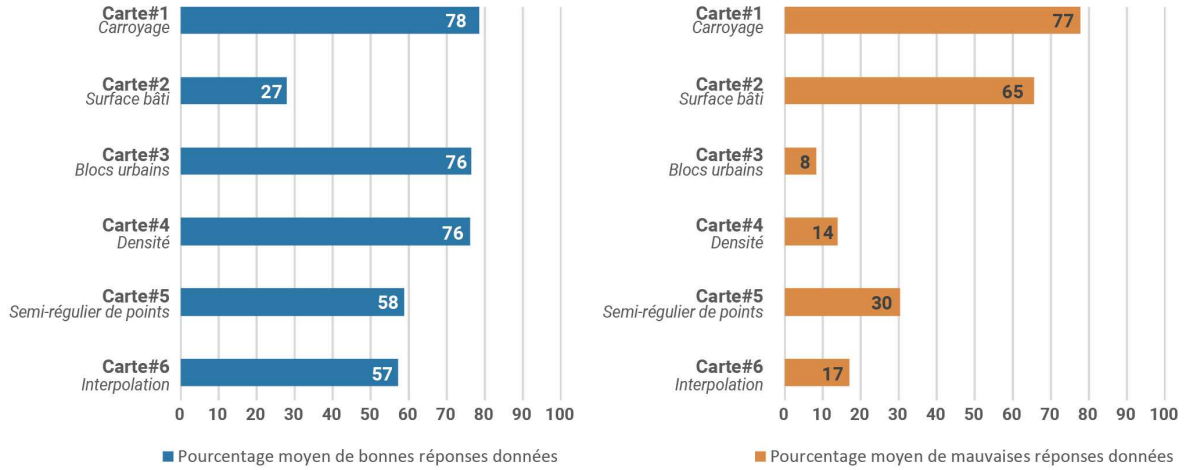


Figure 106 : Fréquence des bonnes et mauvaises réponses à la tâche 3.2, localisation des secteurs les moins touchés (expérimentation #2)

A contrario des cartes #1 et #2, les cartes **#3** et **#4** obtiennent les meilleurs scores avec de 76% en moyenne de bonnes réponses contre très peu de mauvaises réponses (8% pour la carte **#3** et 14% pour la **#4**). Viennent ensuite les cartes **#5** et **#6** dont les pourcentages de bonnes réponses sont proches (58% et 57%). Ces cartes sont 30% moins efficaces vis-à-vis de la tâche précédente. De plus, la fréquence moyenne de mauvaises réponses de la carte **#5** passe ici de 8% à 30%. Le semi-régulier de points semble plus efficace pour identifier les zones les plus touchées (figurés de couleur rouge et de taille plus importante) que les zones les moins touchées (figurés jaunes de taille variable), et ceci qu'importe le niveau cartographique ou le type d'acteurs (Tableau 14).

Tableau 14 : Pourcentage moyen de bonnes réponses [T3.2-1] et de mauvaises réponses [T3.2-2] par niveau cartographique (a) et par catégorie d'acteurs (b) (expérimentation #2)

	Carte #1		Carte #2		Carte #3		Carte #4		Carte #5		Carte #6	
(a) Nv.	T3.2-1	T3.2-2	T3.2-1	T3.2-2	T3.2-1	T3.2-2	T3.2-1	T3.2-2	T3.2-1	T3.2-2	T3.2-1	T3.2-2
Non défini	**80**	**64**	*7*	**89**	**83**	*3*	**66**	**39**	**57**	**28**	53	*3*
Novice	**80**	**75**	*28*	**64**	**72**	*14*	**77**	*16*	**67**	**36**	61	*19*
Suffisant	**85**	**75**	*24*	**61**	**71**	*5*	**86**	*20*	**58**	**31**	64	**21**
Bon	**83**	**76**	*30*	**65**	**74**	*12*	**73**	*6*	**55**	**31**	51	*17*
Excellent	**55**	**88**	*29*	**62**	**73**	*9*	**71**	*16*	**59**	**19**	61	*15*

(b) Cat.	T3.2-1	T3.2-2	T3.2-1	T3.2-2	T3.2-1	T3.2-2	T3.2-1	T3.2-2	T3.2-1	T3.2-2	T3.2-1	T3.2-2
Privé	**82**	**76**	*23*	**72**	**72**	*12*	**79**	*18*	**58**	**31**	**55**	*16*
Public	*40*	**85**	*28*	**56**	**77**	*7*	**66**	*11*	**52**	**29**	**52**	*8*
Fs.*	**82**	**77**	*27*	**56**	**80**	*5*	**79**	*5*	**62**	**33**	**59**	*13*
Sc.*	**80**	**79**	*36*	**59**	**75**	*16*	**75**	*6*	**64**	**34**	**54**	**30**
Étudiant	**100**	**74**	*15*	**71**	**75**	*3*	**75**	*15*	**53**	*18*	**67**	*16*
Autre	**60**	**82**	**63**	**47**	**60**	*23*	**66**	**23**	**60**	**35**	**50**	*18*

*(Fs. : Force de secours & Sc. : Scientifique)

Pour résumer, les représentations **#3** et **#4** paraissent plus efficaces pour les tâches T3.1 et T3.2 (appréciation générale de la carte). Les cartes **#5** et **#6** se révèlent performantes pour la localisation des zones les plus touchées (T3.1) et dans une moindre mesure, la localisation des zones les moins touchées (T3.2). Quant aux cartes **#1** et **#2,** les résultats sont à nuancer. La première semble être plus efficace lorsqu'il s'agit de localiser les secteurs les plus touchés (T3.1), elle laisse peu de place à l'erreur. Une efficacité qui est plus mitigée lorsqu'il s'agit d'estimer les secteurs les moins touchés (T3.2). La seconde carte quant à elle, obtient les moins bons résultats pour les deux tâches. Elle témoigne d'une plus grande difficulté pour les participants à localiser les secteurs les moins touchés avec seulement 27% de bonne réponse contre 65% d'erreurs. Ce moyen de représentation semble donc trop complexe et détaillé dans une approche synoptique. Les résultats sont meilleurs pour les méthodes d'agrégation statistiques.

Analyse visuelle : appréciation fine de la donnée

- **<u>Tâche 4.1 - Estimer les niveaux de dommages à un point précis de la carte :</u>**

À cette étape de l'analyse visuelle, nous avons cherché à préciser la capacité de lecture et d'appréciation de la donnée des différentes techniques cartographiques expérimentées. Pour cela, nous avons demandé aux participants d'estimer le niveau de dommage à un point précis de la carte. Avant de détailler les résultats, il est important de rappeler que chaque carte ne dispense pas les mêmes informations. Les cartes **#1, #3** et **#4** offrent des **informations quantitatives** basées sur le recensement des bâtiments endommagés (sans précision du niveau de dommage). Ces informations sont agrégées par une méthode carroyage, de blocs urbains et la densité. La carte **#6** utilise une interpolation de surface qui illustre les niveaux d'endommagement et de fait, l'information est **qualitative**. Seules les cartes **#2** et **#5** fournissent une information à la fois **quantitative et qualitative**, d'une part par l'emprise individuelle du bâtiment diagnostiqué et d'autre part par l'application d'un semi-régulier de points proportionnels.

Les résultats sont illustrés sous la forme d'un graphique (Figure 107). Il présente trois types de réponses : les taux moyens de bonnes réponses, de réponses « par défaut » et de réponses fausses pour chaque carte. Les réponses sont considérées « par défaut » lorsque le participant utilise par exemple la classe la plus élevée des classes quantitatives de légende pour qualifier un fort niveau de dommage. Ces réponses sont implicites à la volonté du participant de répondre à cette tâche faute de données qualitatives.

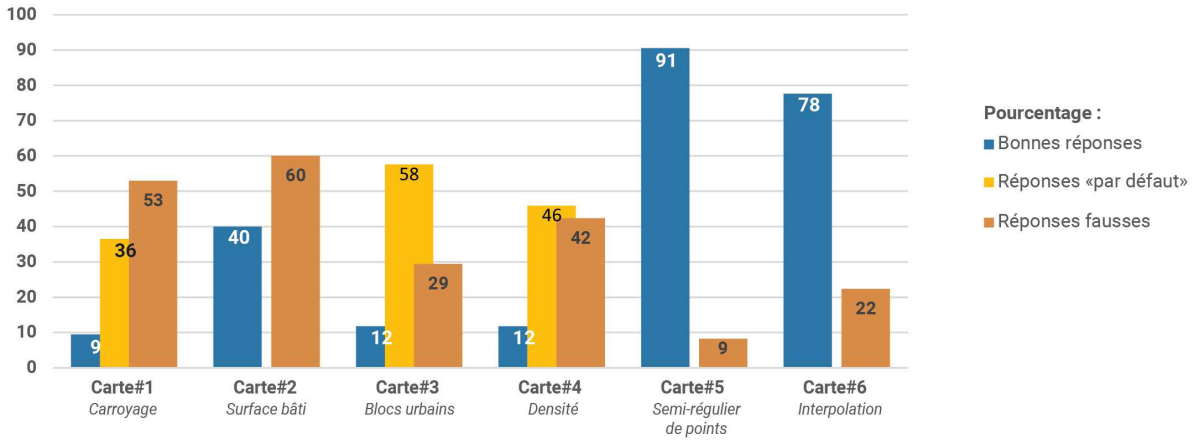


Figure 107 : Résultats de la tâche 4.1, estimation du niveau de dommage à un point précis (expérimentation #2)

Lors de la réalisation de la tâche 4.1, les résultats ont montré une nette efficacité des représentations qualitatives utilisées sur les cartes **#5** et **#6** (Figure 107). Les taux de bonnes réponses sont respectivement estimés à 91% et 78%. À noter également que les taux de mauvaise réponse sont relativement faibles de 8% et 22%. La carte **#2**, fournissant également une information qualitative, offre 40% de bonnes réponses contre 60% de mauvaise réponse en moyenne.

Pour les représentations quantitatives (**#1**, **#3** et **#4**), l'analyse a montré que les taux d'erreurs sont supérieurs aux taux de réponses correctes. Dans ce cas précis, il était attendu du participant qu'il note son incapacité à répondre à la question. Seule une faible part de ces derniers, entre 9 et 12%, ont fait cette observation. En moyenne 47% des participants en moyenne ont estimé un niveau de dommage en se basant « par défaut » sur l'information quantitative illustrée en légende dans ces trois cartes. 42% des participants en moyenne ont répondu par des niveaux de dommages en utilisant des termes comme « grave », « fort », etc., ou bien ils ont donné une fausse estimation du niveau des dommages parfois contraire à leur estimation des quantités.

Lors de la réalisation de cette tâche, les cartes qui ont communiqué une information qualitative ont obtenu majoritairement les meilleurs résultats, hormis la carte **#2**.

- **<u>Tâche 4.2 - Estimer la quantité de dommages à un point précis de la carte :</u>**

En réponse aux observations précédentes, concernant les erreurs introduites par la lecture des représentations strictement qualitatives, les cartes uniquement **quantitatives** ont également introduit des biais d'interprétation pour la tâche T4.2. C'est effectivement le cas pour la carte **#6** pour laquelle plus de 80% des résultats sont inexacts (Figure 108). De plus, les réponses obtenues sont plus hétérogènes : 9% ont répondu par « peu », 37% par « moyen » et 40% par « beaucoup ». Seulement 14% ont répondu que ce n'était pas possible.

La carte **#5** obtient les meilleurs résultats en moyenne avec 93% de réponses correctes contre 7% de mauvaises réponses. Des chiffres sensiblement équivalents avec ceux de la tâche précédente (Figure 107). Grâce à la différenciation de taille des polygones qui se base sur la quantité de bâtiments concernés et à la variation de couleurs pour les niveaux de dommages, cette représentation semble utile pour distinguer simultanément ces deux renseignements.

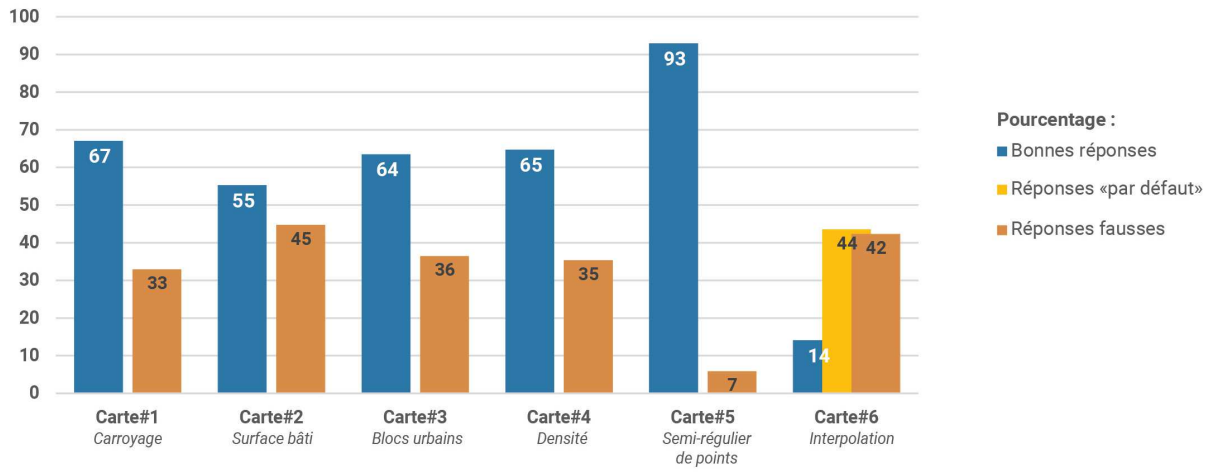


Figure 108 : Résultats de la tâche #4, estimation de la quantité de bâtiments touchés à un point précis (expérimentation #2)

En comparaison, les résultats de la carte **#2** ont été plus mitigés. Pourtant, sa représentation permet l'interprétation de la distribution spatiale des bâtiments et des niveaux de dommages. Les cartes **#1**, **#3**, **#4**, ont affiché des résultats positifs compris entre 64% et 67% pour une moyenne de mauvaises réponses estimée à 34%. Pour ces représentations strictement **quantitatives**, les taux de bonnes réponses, même s'ils sont supérieurs à 50%, laissent perplexe. Ne devraient-ils pas être plus importants ? Nous avons dès lors cherché donc à identifier les raisons de cette perte d'efficacité. Klett (***2011***) avait énoncé les biais potentiellement causés par les représentations quantitatives et les différentes méthodes de calcul qui y étaient associées. Ces pistes ont été approfondies en s'attardant sur les toponymes à analyser des cartes **#1** (1); **#3** (2) et **#4** (3), soit les secteurs [**H**], [**D**] et [**F**].

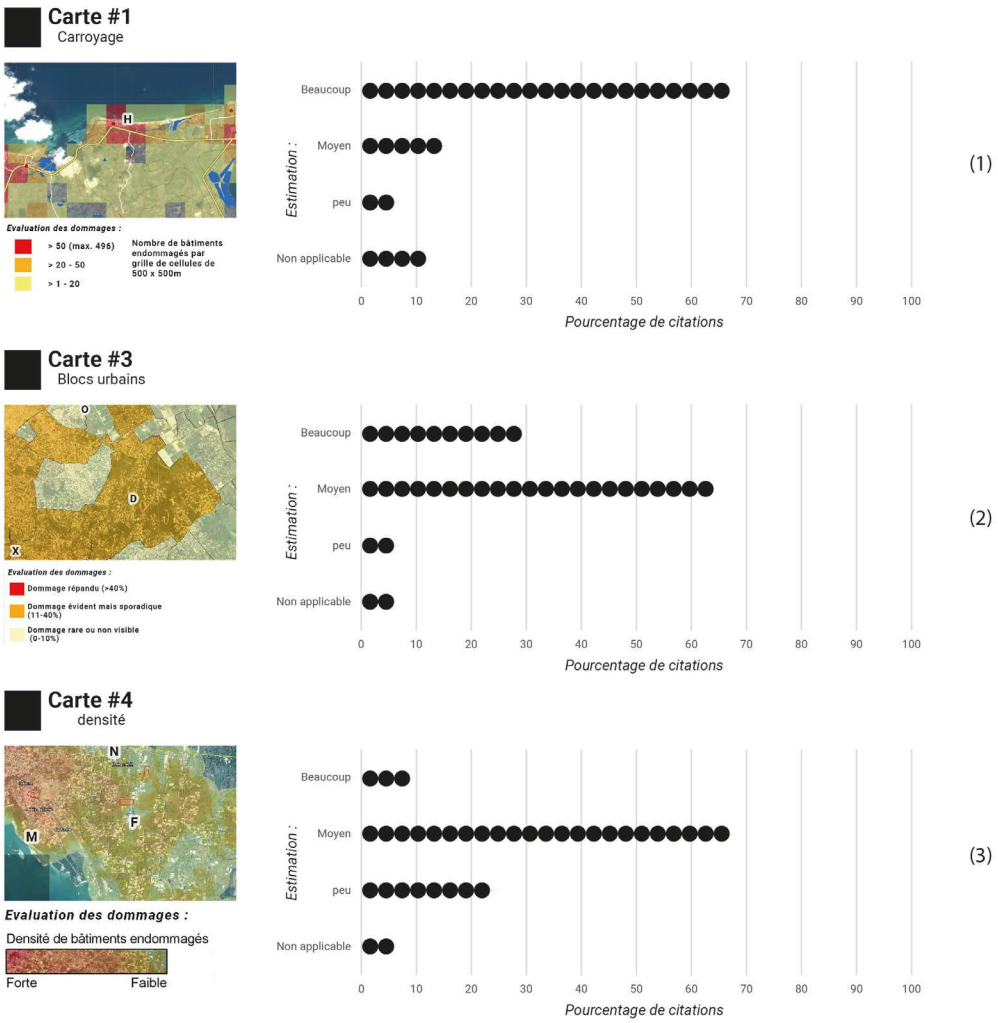


Figure 109 : Analyse des réponses de la tâche T4 sur l'estimation quantitative des dommages à un point précis pour les cartes #1 (1) ; #3 (2) et #4 (3) (expérimentation #2)

Les dommages de la carte **#1** sont illustrés par un carroyage de 500*500 mètres. Malgré la relative simplicité de cette technique, Klett (***2011***) évoque des problèmes de résolution du maillage et d'une interprétation qui peut être biaisée par des limites artificielles causées par le symbole régulier. C'est par exemple le cas du secteur [**H**]. Le lecteur se confronte alors à des mailles de différentes valeurs (*>1-20 et >50*) qui intersectent le toponyme et dont il peut chercher à en calculer la moyenne. L'agrégation des dommages par Bloc urbain de la carte **#4** a offert plus de facilité de perception grâce à la délimitation des zones par le réseau routier. Cependant, la superficie des polygones dépend de la densité de ce même réseau. Cela crée un maillage hétérogène dont les surfaces les plus grandes, comme ici avec la zone [**D**],

rendent difficile la localisation des principaux dommages. Au premier regard, l'ensemble de la zone parait concerné. Pourtant, nous avons vu précédemment (cf. supra 7) que ces dommages pouvaient potentiellement se concentrer sur une partie de la maille. De plus, les effets de transparences ont pu engendrer un sentiment d'importance du nombre de bâtiments touchés alors que selon la légende cette estimation était comprise entre 11 et 40% du bâti. Ces effets expliqueraient la surestimation de 30% des réponses pour lesquelles les participants ont jugé que « beaucoup » de bâtiments étaient touchés. L'interpolation de surface ayant servi à la réalisation de la densité de la carte **#4** est une technique utile pour estimer la distribution spatiale des bâtiments endommagés. Cependant, il s'agit d'une visualisation complexe qui se base sur des rayons de recherche prédéfinis (ici 200 mètres). Le principal inconvénient réside dans les effets de bord de la représentation visuelle provoquant des rendus plus diffus. Cela a pu rendre l'analyse plus confuse de certains secteurs comme pour [**F**] dont il est plus difficile d'estimer la quantité de bâtiments touchés. Même si d'après l'opinion générale le nombre de bâtiments endommagés est estimé comme « moyen » (65% des lecteurs), 22% des participants ont indiqué que « peu » de bâtiments étaient représentés.

Pour conclure, l'analyse des résultats issue des tâches d'analyse visuelles (T3 et T4) a démontré que la carte **#5** (semi-régulier de points) a obtenu les meilleurs résultats (Figure 110). Elle est suivie par les cartes **#4** (densité), **#3** (blocs urbains) et **#6** (interpolation). Le semi-régulier de points (**#5**) a fourni un bon compromis en matière de localisation des secteurs les plus touchés (T3.1) et l'estimation des données qualitatives et quantitatives sur le dommage (T4.1 et T4.2). La carte **#2** (surface au bâti) a été moins efficace pour l'ensemble des tâches malgré sa capacité à fournir une double information (quantité et niveaux de dommages).

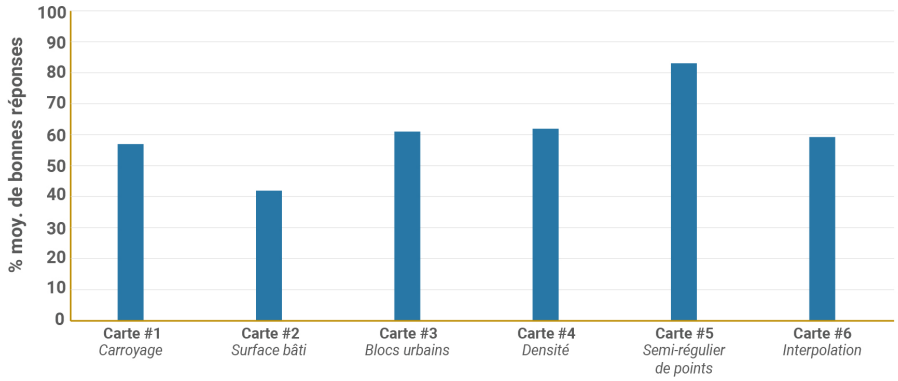


Figure 110 : Pourcentages moyens de bonnes réponses pour l'ensemble des tâches d'analyse visuelle (T3 et T4) (expérimentation #2)

9.2.3. *Résultats de la phase de mémorisation des données transmises par les cartes de dommages*

Analyse générale de la mémoire collective :

Dans cette section, les résultats de la tâche de mémorisation (T5) sont traités sans faire de distinction typologique. Ce travail permet d'apprécier et de spatialiser pour chacune des cartes les taux de correspondance généraux de la mémoire collective à partir de quatre classes : <25% ; 25-50% ; 50-75% ; ≥75% (Figure 111, a). Cette figure est complétée par une analyse du taux de mémorisation correcte

pour chacune des cartes (Figure 111, b). Ces taux ont été calculés à partir de la correspondance entre les mailles les plus touchées identifiées sur les cartes d'origine et les différentes classes de correspondance issues de la mémoire collective.

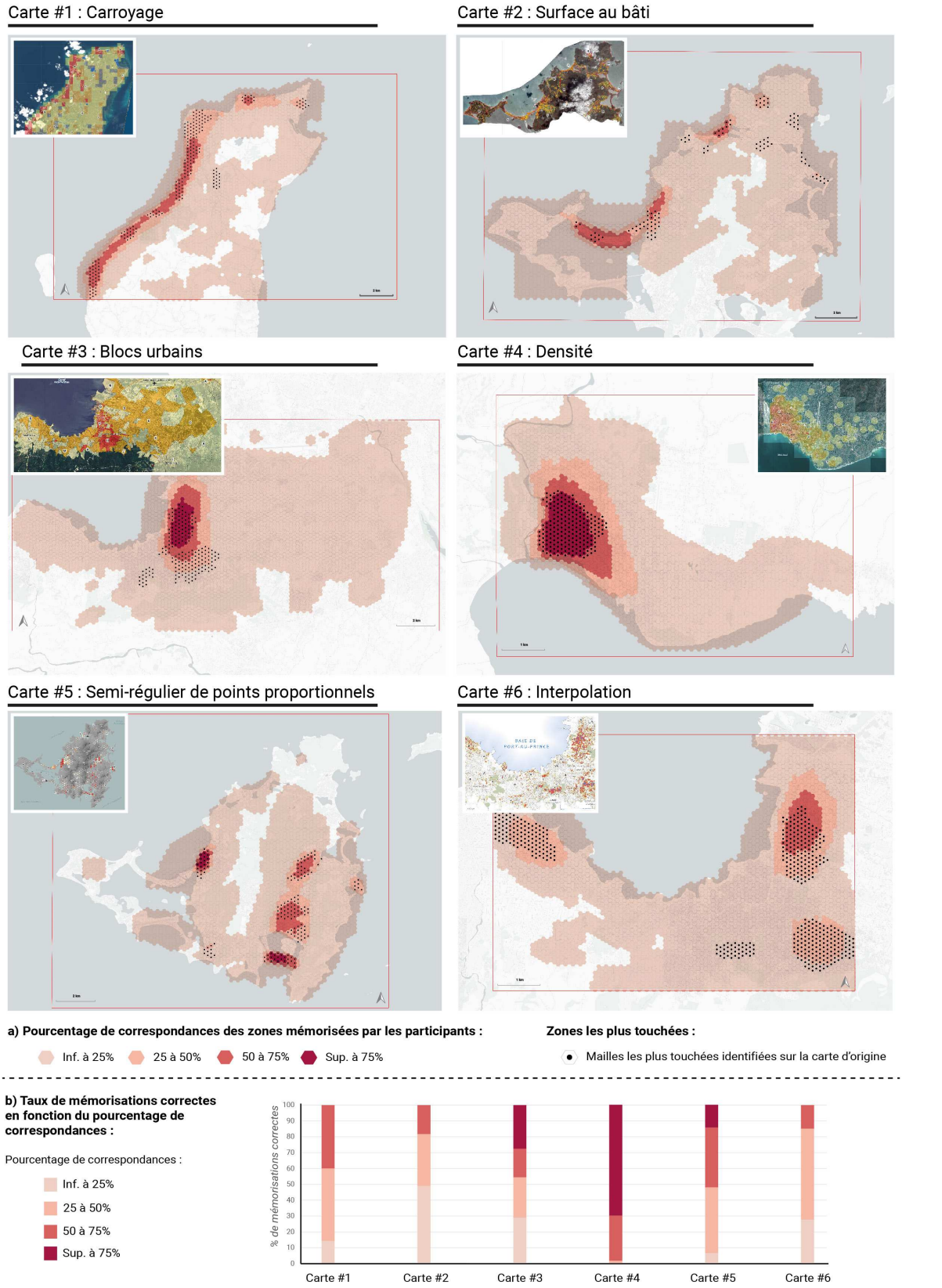


Figure 111 : Pourcentage de correspondances des zones mémorisées par les participants pour les 6 représentations (a) et taux de mémorisations correctes en fonction du pourcentage de correspondance (b) (expérimentation #2)

À partir de ces résultats, les cartes **#4, #5** et **#3** ont obtenu les pourcentages de correspondance les plus élevés. De fait, elles ont eu respectivement les meilleurs taux de mémorisation correcte. La carte **#4**, notamment, affiche des zones de forte correspondance de la mémoire collective (≥75%) dans lesquelles ont été répertoriées 70% des mailles les plus touchées identifiées sur ce secteur. Ces résultats passent à 99% en considérant les taux de correspondance ≥50%. Pour les cartes **#3** et **#5**, les taux de correspondance ≥75% ont regroupé 15% et 28% des zones les plus touchées et respectivement 51% et 45% pour les taux de correspondance ≥50%. Pour ces deux cartes, les mailles les plus touchées ont été répertoriées en moyenne dans des taux de correspondance proches de 50% (47% en moyenne pour la carte **#5** et 46% pour la carte **#3**). L'analyse cartographique a démontré qu'une seule zone est ressortie des cartes **#4** et **#3**. Cette dernière carte a notamment favorisé la mémorisation d'un des trois secteurs en particulier. Des taux de correspondance plus faibles de la mémoire collective (<25%) ont été concentrés sur l'ensemble des zones orange de cette carte. La carte **#5** montre que ce sont principalement quatre des six secteurs qui ont été bien mémorisés par au moins 50% des participants.

Viennent ensuite les cartes **#1, #6** et **#2** dont les pourcentages de correspondance ont été inférieurs à 75%. La carte **#2** a obtenu les moins bons résultats à la tâche de mémorisation. Les mailles les plus touchées sont répertoriées pour des taux de correspondance moyens de 30% contre 45% et 34% pour les cartes **#1** et **#6**. Moins de 20% des mailles les plus touchées des cartes **#2** et **#6** sont contenus pour les tranches de 50% à 75%. Ils ont atteint 40% pour la carte **#1**. Cette dernière a montré que les zones bordant la côte ouest ont été les mieux retenues par les participants. C'est également le cas pour la carte **#2** pour laquelle trois secteurs ressortent. Un seul sur les quatre a été retenu pour la carte **#6**.

Cette première analyse générale fait donc ressortir trois cartes pour lesquelles les zones les plus touchées ont été bien mémorisées par au moins 75% des participants. En outre, l'analyse cartographique a démontré que cette tâche abstraite a été particulièrement bien réalisée pour plus de la moitié des secteurs identifiés lors des tâches d'analyse visuelle. La technique de densité, puis dans un second temps le semi-régulier de points et les blocs urbains ont eu un fort potentiel de mémorisation. Néanmoins, il faut noter que la forte concentration des données sur une seule zone peut avoir favorisé ce processus de mémorisation. Par ailleurs, malgré une forte dispersion des données de la carte **#5**, la représentation cartographique par semi-régulier de points dénote une bonne capacité de mémorisation. Le carroyage obtient des résultats plus partagés et ce sont finalement les cartes utilisant la surface des bâtis et l'interpolation qui obtiennent les moins bons résultats. À noter que pour ces cartes (**#2 et #6**), les zones mémorisées et retranscrites par les participants ont été soit très grossières ou ont formé des ilots bien isolés les uns des autres, que l'on ne perçoit pas dans cette représentation carroyée des taux de mémorisation. De plus, vis-à-vis des réponses obtenues aux questionnaires, certains secteurs auraient dû potentiellement ressortir ; c'est par exemple le cas du secteur [**H**] de la carte **#6** (cf. Annexe 7), pour laquelle 40% des participants ont estimé que « beaucoup » de bâtiments étaient endommagés (Figure 108) lors de la réalisation de la tâche 4.2. Il apparait donc que ces deux techniques sont moins performantes pour cette tâche.

Analyse détaillée selon les catégories d'acteurs et les niveaux en cartographie

- **<u>Analyse des capacités de mémorisation par catégorie d'acteurs</u>**

Dans cette section, les résultats ont été synthétisés en Figure 112. Cette dernière permet une comparaison transversale des résultats obtenus par les différentes catégories d'acteurs, à la fois pour une même carte, mais également à l'échelle de l'ensemble de l'échantillon cartographique (Figure 112, a). Une partie statistique permet d'estimer le pourcentage de mémorisation correcte par tranche de correspondance de la mémoire collective des différents acteurs (Figure 112, b). Elle donne également une estimation de la distribution spatiale des mailles en fonction des taux de correspondance de ces mémoires collectives par rapport au total des mailles toutes catégories confondues (Figure 112, c). Cette répartition donne un aperçu de la précision des zones mémorisées par catégories d'acteurs.

À partir de ces résultats et conformément à nos observations précédentes, la carte **#4** (densité) a obtenu les meilleurs résultats, tant sur les pourcentages de correspondance que sur leur exactitude vis-à-vis des mailles les plus touchées. Elle s'est montrée particulièrement efficace pour les scientifiques avec des pourcentages de correspondances ≥75% regroupant 88% des mailles les plus touchées. Qui plus est, la distribution spatiale des pourcentages de correspondance de cette catégorie vis-à-vis de l'ensemble de l'échantillon a démontré la précision de la mémorisation.

Les cartes **#5** (semi-régulier de points) et **#3** (blocs urbains) arrivent ensuite avec des pourcentages de mémorisation ≥75% pour chacune des catégories. Les taux de mémorisation corrects sont apparus relativement homogènes pour le semi-régulier de points. Toutefois, cette représentation s'est montrée plus efficace pour les catégories « autres », « privés », « étudiants » et « forces de secours ». Hormis pour les catégories « étudiants » et « autres », cette carte a fait l'objet d'une bonne précision des zones mémorisées par les participants. La carte **#3** quant à elle, a été mémorisée de manière plus efficace par les « étudiants », les « scientifiques » et les « forces de secours ». Toutefois, elle est apparue comme moins efficace pour les acteurs « publics » malgré des zones mémorisées plus précises que pour les autres catégories d'acteurs.

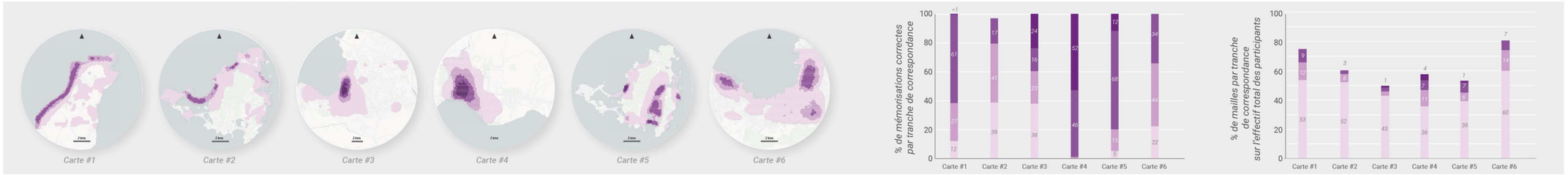
A contrario, la carte **#2** (surface au bâti) et la carte **#6** (interpolation) ont obtenu les moins bons résultats toutes catégories confondues. Pour la carte **#2**, seules les catégories « scientifiques » et « étudiants » ont mémorisé des zones dont les pourcentages de correspondances sont ≥75%. Pour la carte **#6**, il s'agissait des catégories « forces de secours », « scientifiques », « étudiants » et « autres ». La carte **#1** (carroyage) a été mieux mémorisée par les « scientifiques », « étudiants » et « autres », avec notamment de meilleurs pourcentages de correspondances et de mémorisation correcte. Ces observations peuvent s'expliquer par une utilisation plus courante de la technique de carroyage dans les protocoles d'exploitation SIG des données manipulées dans le milieu académique et de la recherche.

a) Pourcentage de correspondances dans la mémorisation par catégorie d'acteurs:

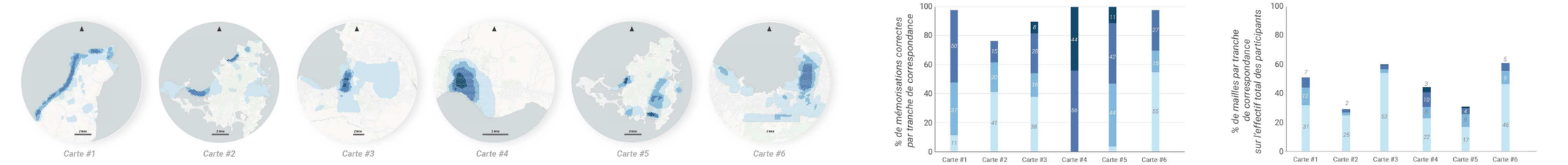
b) Pourcentage de mémorisations correctes par tranche de correspondance :

c) Distribution spatiale par rapport au total des cellules toutes catégories confondues :

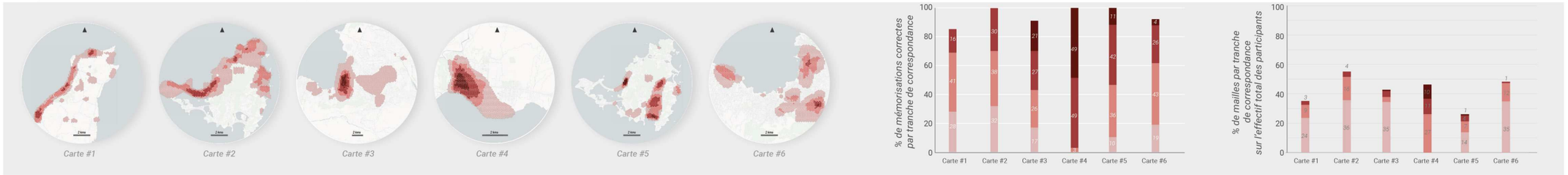
Privés *Pourcentage de correspondances : 0-25% 25-50% 50-75% 75-100%*



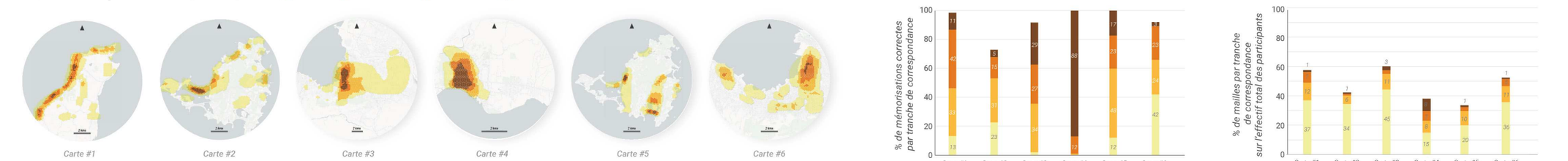
Publics *Pourcentage de correspondances : 0-25% 25-50% 50-75% 75-100%*



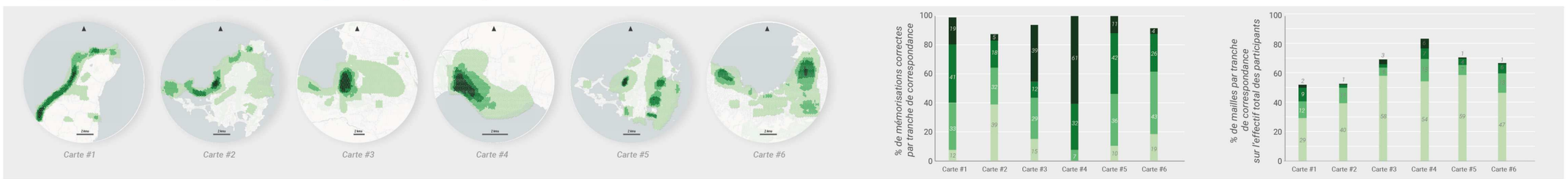
Force de secours *Pourcentage de correspondances : 0-25% 25-50% 50-75% 75-100%*



Scientifiques *Pourcentage de correspondances : 0-25% 25-50% 50-75% 75-100%*



Etudiants *Pourcentage de correspondances : 0-25% 25-50% 50-75% 75-100%*



Autres *Pourcentage de correspondances : 0-25% 25-50% 50-75% 75-100%*

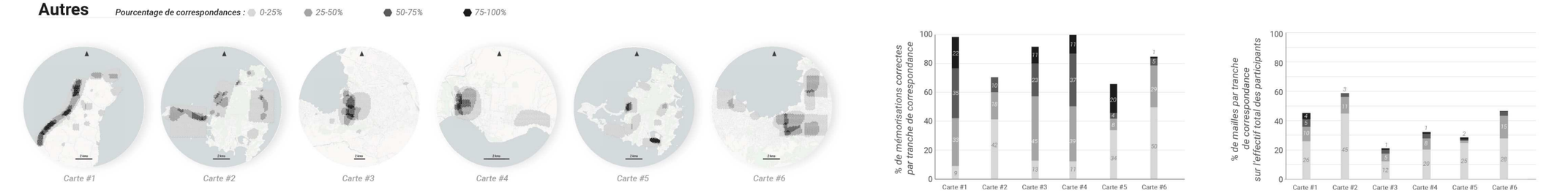


Figure 112 : a) Comparaison spatiale des taux de correspondance par catégorie d'acteurs, pour les 6 cartes ; analyse des pourcentages de mémorisation correcte (b) et distribution spatiale par rapport au total des mailles toutes catégories confondues (c) (expérimentation #2)

- **<u>Analyse de la mémorisation en fonction du niveau en cartographie :</u>**

L'analyse se poursuit par le traitement de la mémoire collective en fonction du niveau des participants en cartographie. Ces résultats ont été détaillés de la même manière que la figure précédente et intégrés dans la Figure 113. L'analyse a démontré une fois de plus que la carte **#4** (densité) s'est montrée plus efficace dans la mémorisation, quel que soit le niveau en cartographie des participants. C'est principalement vrai pour les niveaux « suffisant », « bon » et « excellent » dont les pourcentages de correspondance ≥75% regroupaient respectivement 79%, 65% et 59% des mailles identifiées comme les plus touchées (Figure 113, b). Toutefois, les zones mémorisées par moins de 25% des participants ont été plus larges que pour les autres niveaux (Figure 113, c). Les cartes **#5** (semi-régulier de points) et **#3** (blocs urbains) arrivent ensuite respectivement en seconde et troisième position. Le semi-régulier de points (carte **#5**) semble avoir été mieux mémorisé par les participants ayant un niveau cartographique « non défini », « bon », « novice » et « excellent ». Les pourcentages de correspondances ≥50% regroupaient respectivement 67%, 66%, 57% et 53% des mailles les plus touchées. De plus, les zones mémorisées se sont avérées globalement plus précises que pour les autres techniques. Au moins 4 des 6 secteurs ont été correctement mémorisés par les participants. Les blocs urbains (carte **#3**) ont été mieux mémorisés par les participants ayant un niveau « suffisant » et « excellent ». Les pourcentages de correspondance ≥50% ont intégré respectivement 65% et 48% des mailles les plus touchées. À l'instar de la carte **#5**, la carte **#3** a globalement été plus précise que les autres techniques, hormis pour le niveau « bon ». Notons qu'au niveau « excellent » une zone est ressortie, à l'Est, pour 25 à 50% des citations (Figure 113, a). La carte **#1** (carroyage) est arrivée en quatrième position avec des pourcentages de correspondances ≥50% regroupant 80% et 70% des mailles les plus touchées pour les participants ayant un niveau « suffisant » et « excellent ». Ces niveaux ont d'ailleurs fait ressortir la zone située au nord de l'île pourtant occultée lors de l'analyse générale de la mémoire collective. Enfin, les cartes **#6** (interpolation) et **#2** (surface au bâti) sont arrivées en dernière position. La représentation par interpolation s'est montrée légèrement plus efficace que la carte **#2**, notamment pour les participants ayant un niveau « non défini » et « suffisant ». Les niveaux « non définis » ont été les seules à avoir mémorisé, pour au moins 50% des pourcentages de correspondance, trois des quatre secteurs les plus touchés de cette carte (Figure 113, a). Pour la carte **#6**, les taux de correspondance se sont révélés d'ailleurs moins importants au fur et à mesure de l'augmentation des niveaux en cartographie. Inversement les performances de cette mémorisation se sont améliorées pour la carte **#2** lors du passage du niveau « non défini » à « excellent ».

En résumé, la carte **#4** (densité) a obtenu les meilleurs résultats pour la tâche de mémorisation et ceci, qu'importe la catégorie d'acteurs et le niveau en cartographie. Les cartes **#5** (semi-régulier de points) et **#3** (blocs urbains) ont globalement atteint de bons résultats. Néanmoins, le semi-régulier de points a affiché des résultats plus homogènes pour l'ensemble des catégories d'acteurs et leur niveau cartographique. Les taux de mémorisation ont été plus efficaces lorsqu'il s'agissait de participants ayant un niveau « non défini » ou « bon ». Ceci malgré une difficulté relative à la dispersion de la donnée et à la complexité potentielle engendrait par une double information, quantitative et qualitative. Ces résultats ont démontré également une plus grande difficulté pour les participants à mémoriser et retranscrire les zones les plus touchées des cartes **#6** (interpolation) et **#2** (surface au bâti). Pour cette dernière, seuls les niveaux « bons » et « excellents » ont amélioré les résultats de la mémoire collective.

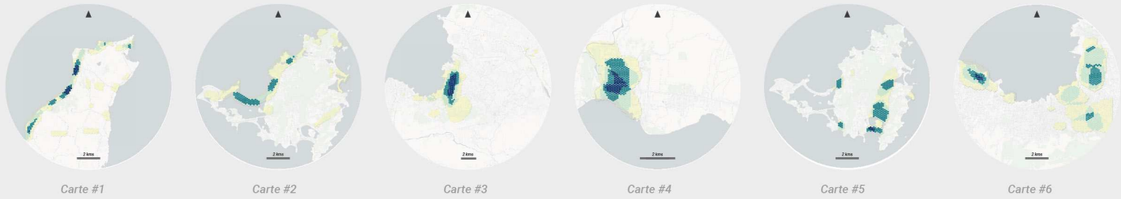
a) Pourcentage de correspondances dans la mémorisation par niveau cartographique

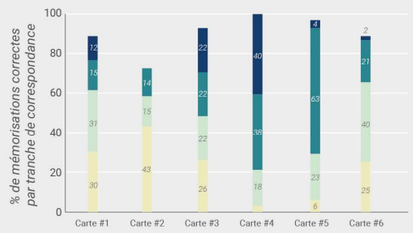
b) Pourcentage de mémorisations correctes par tranche de correspondance :

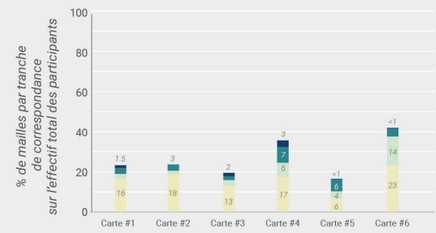
c) Distribution spatiale par rapport au total des cellules toutes catégories confondues :

Non défini

Pourcentage de correspondances : 0-25% 25-50% 50-75% 75-100%

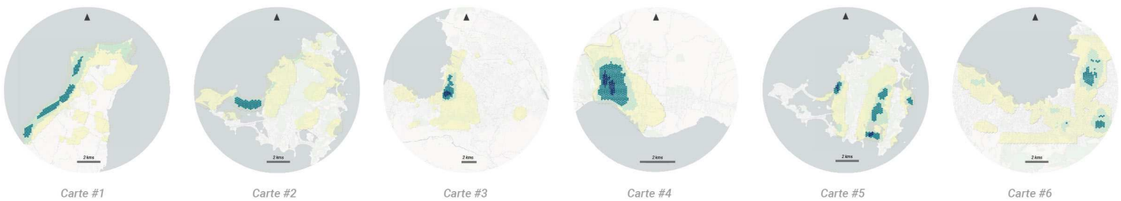


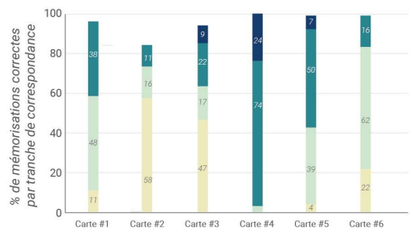


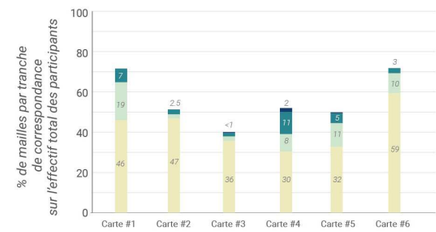


Novice

Pourcentage de correspondances : 0-25% 25-50% 50-75% 75-100%

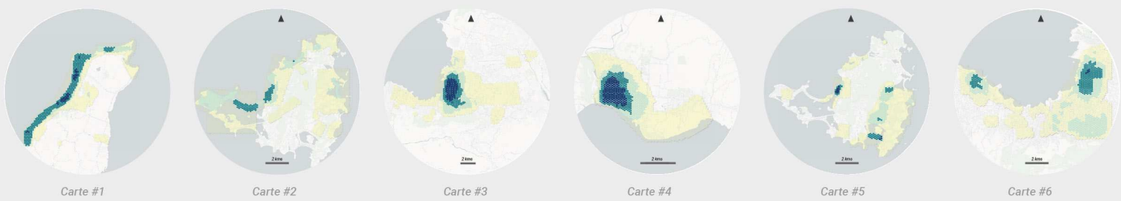


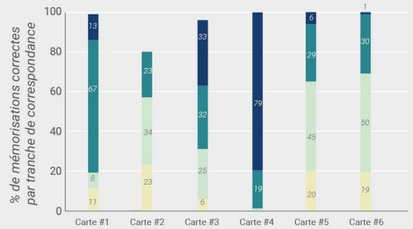




Suffisant

Pourcentage de correspondances : 0-25% 25-50% 50-75% 75-100%

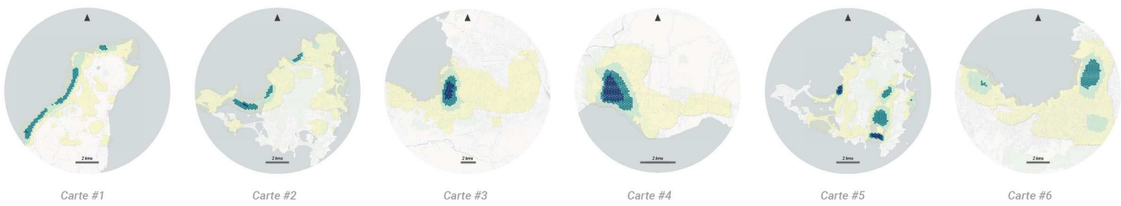


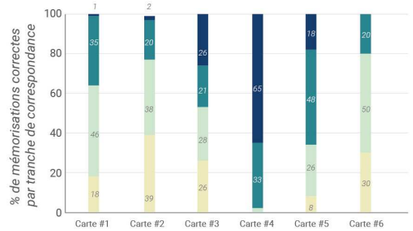


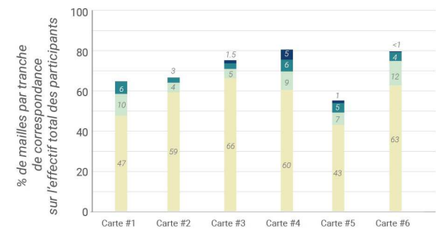


Bon

Pourcentage de correspondances : 0-25% 25-50% 50-75% 75-100%

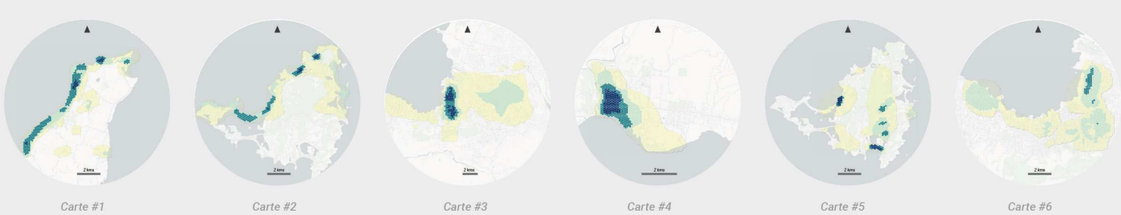


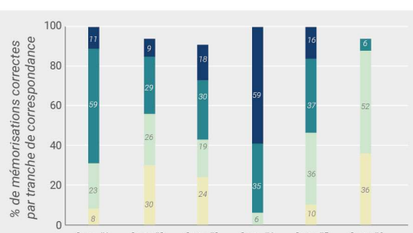




Excellent

Pourcentage de correspondance : 0-25% 25-50% 50-75% 75-100%





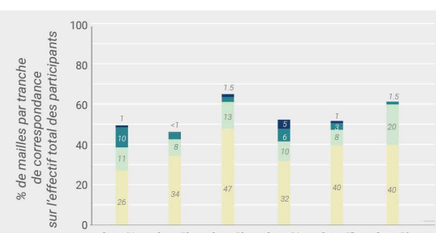


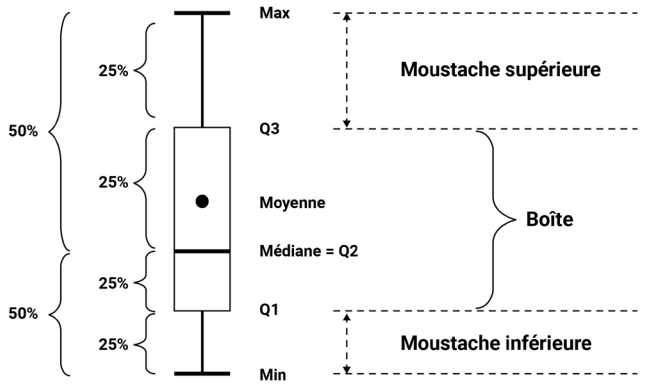
Figure 113 : a) Comparaison spatiale des taux de correspondance par niveau cartographique, pour les 6 cartes ; analyse des pourcentages de mémorisation correcte (b) et distribution spatiale par rapport au total des mailles toutes catégories confondues (c) (expérimentation #2)

9.2.4. *Évaluation des types de représentation cartographique des dommages*

Préférences utilisateurs :

Pour rappel, les participants ont attribué une note de 1 (très mauvaise) à 5 (très bonne) pour chaque carte selon des critères d'efficacité visuelle de la représentation des dommages (a), de la charge d'information (b), de l'utilité des informations en arrière-plan (c) et du niveau de certitude attribué à leur analyse (d).

Les résultats sont présentés sous la forme de boites à moustache[34] (Figure 114). Cette figuration permet de visualiser la moyenne des notes (point), la médiane (tiré au centre des boites) et les différents seuils interquartiles composés des boites et des barrettes. Elles représentent respectivement : 0-25% ; 25-50%, 50-75% et 75-100% des notes fournies par les participants. La carte **#3** (blocs urbains) a obtenu en moyenne les meilleurs résultats. Elle a particulièrement été bien notée concernant son efficacité visuelle pour représenter les dommages (moyenne de 3.9/5). Plus de 50% des participants lui ont attribué une note supérieure à 4/5. Plus de 75% des participants ont également octroyé des notes égales ou supérieures à 3/5 pour l'utilité de l'arrière-plan. À l'inverse, la carte **#2** (surface au bâti) a eu systématiquement les notes les plus basses. L'efficacité visuelle de cette technique a affiché une note moyenne de 2.7/5. 50% des participants lui ont attribué une note inférieure à 3 (ni mauvaise ni bonne). Les cartes **#5** (semi-régulier de points) et **#4** (densité) arrivent en deuxième et troisième position. Le semi-régulier de points est noté avec une moyenne de 3.6/5 en termes d'efficacité. Cela a fait de cette représentation la seconde à être la mieux notée pour ce critère. Au moins 50% des participants ont considéré que cette technique était bonne à très bonne. Le niveau de certitude qui lui a été attribué est équivalent à la carte **#3** (moyenne de 3.5/5). Toutefois 50% des participants ont considéré que la charge d'information en arrière-plan était moins bonne (3/5). Concernant la carte **#4** (densité), l'efficacité a été évaluée en moyenne à 3.4/5, la plaçant au-dessus du carroyage, de l'interpolation et des surfaces au bâti. L'évaluation concernant l'utilité de son arrière-plan a été similaire à la carte **#5**. Néanmoins, le niveau de certitude a atteint une note inférieure (3.2/5) aux techniques de blocs urbains (3.5/5), de semi-réguliers de points (3.5/5) et de carroyage (3.3/5). Elle a été mieux notée que les cartes **#6** (interpolation) et **#2** (surface au bâti). Celles-ci obtiennent respectivement une note moyenne de 3.1/5 et de 3/5 pour le critère d'efficacité visuelle.



34

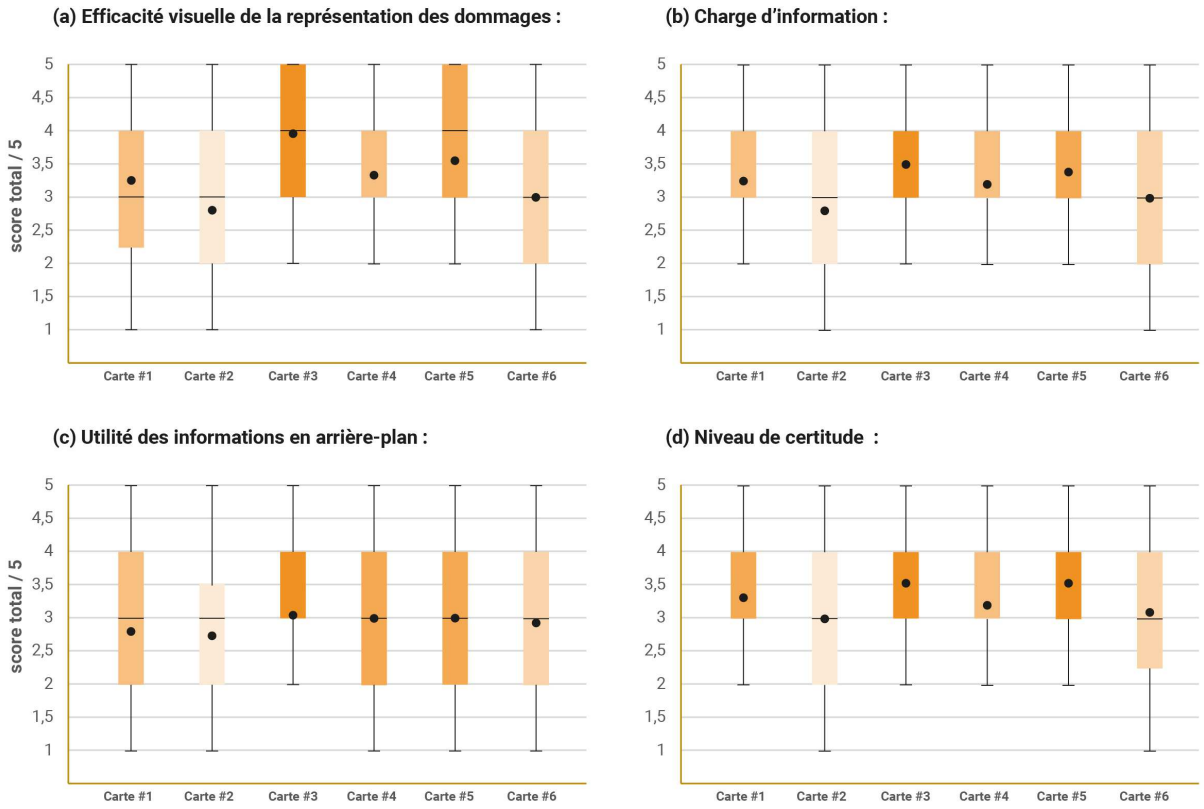


Figure 114 : Résultats de la comparaison du critère : qualité visuelle de la représentation des dommages (expérimentation #2)

L'analyse est affinée en détaillant les notes attribuées aux critères d'efficacité visuelle (a), de charge d'information (b) et de niveau de certitude (d) selon les différents niveaux en cartographie des participants (Figure 115). Les résultats de cette classification ont démontré que l'efficacité visuelle de la carte **#3** (blocs urbains) a été estimée à une note de 3/5 pour au moins 75% de l'ensemble des niveaux en cartographie. Cela n'a pas semblé se répercuter sur le niveau de certitude qui a baissé avec la montée du niveau en cartographie. Inversement, ces résultats ont établi que plus le niveau en cartographie s'améliorait et plus l'efficacité visuelle perçue par les participants pour la carte **#6** (interpolation) diminuait, tout comme la charge d'information qui a été moins bien notée. Cela n'a pas réduit pour autant le niveau de confiance des participants ayant un niveau « bon » et « excellent ». Pour les cartes **#4** (densité) et **#5** (semi-régulier de points), l'efficacité visuelle, la charge d'information et le niveau de certitude ont eu tendance à s'améliorer avec l'augmentation des connaissances cartographiques. La carte **#1** (carroyage) a illustré une perception contradictoire entre le niveau de certitude et l'efficacité visuelle perçue, notamment pour les niveaux « non défini » et « novice ». Pour les « novices » par exemple, l'efficacité visuelle n'a pas été estimée optimale, mais ils se sont déclarés « sûrs » de leur évaluation. Pour finir, les notes obtenues pour la carte **#2** ont globalement montré que les participants considéraient que cette technique était moins efficace visuellement, ceci qu'importe le niveau en cartographie. De plus, leur niveau de certitude n'a été ni mauvais ni sûr.

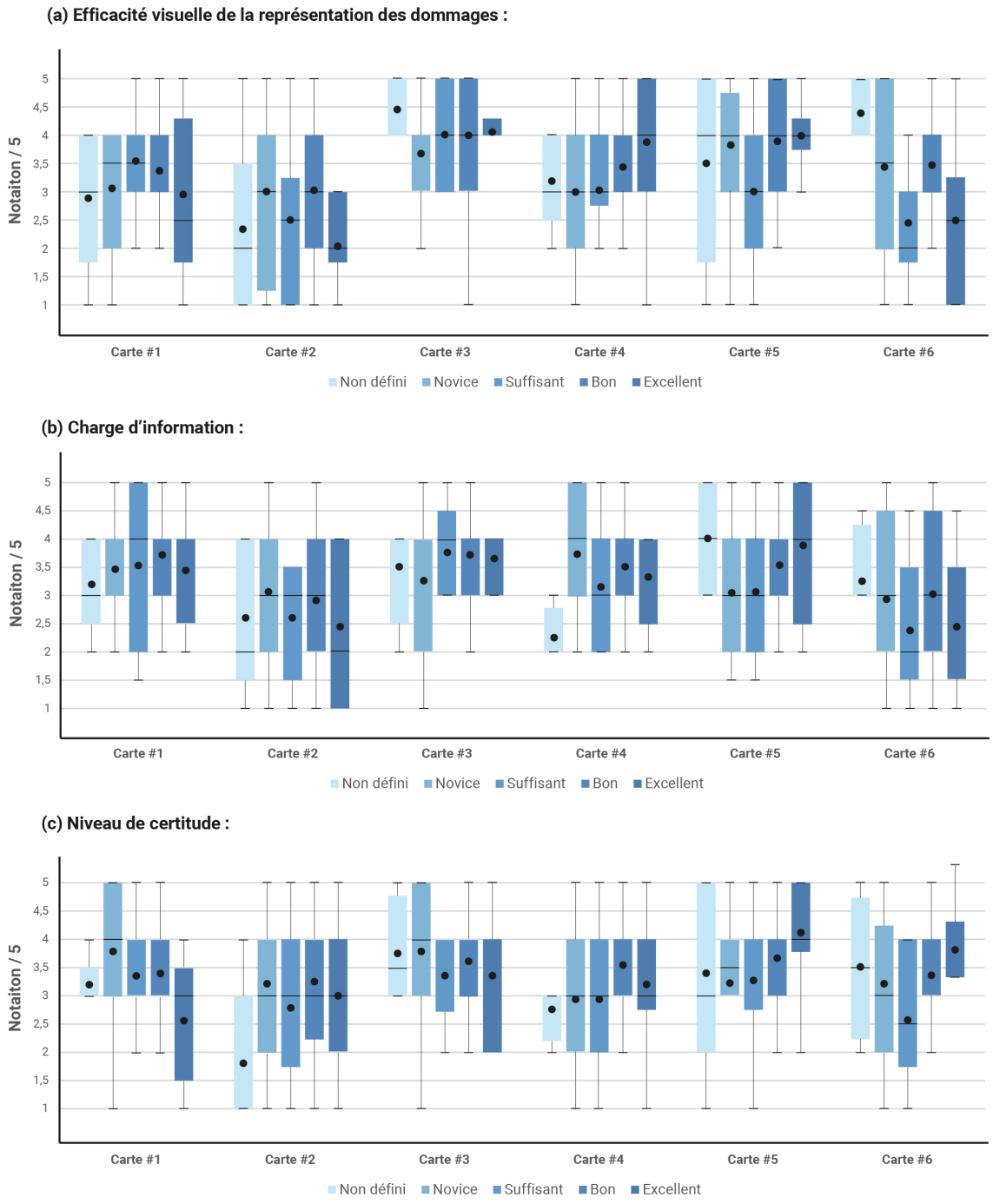


Figure 115 : Comparaison des critères d'efficacité visuelle (a), de charge d'information (b) et de niveau de confiance (d) selon les niveaux en cartographie (expérimentation #2)

Pour résumer, l'attribution des notes par les participants semble avoir été partiellement liée aux résultats obtenus lors des phases d'analyse visuelle et des tâches de mémorisation. La carte **#2** (surface au bâti) par exemple, s'est vu attribuer les moins bonnes notes sur l'ensemble des critères précédents, ce qui confirme les observations précédentes. À l'inverse, 25% de l'échantillon ont considéré que la carte **#5** était plus efficace visuellement que la carte **#4** (densité). Pourtant cette dernière a été plus efficace pour les tâches de mémorisation au regard des différents niveaux en cartographie et catégories d'acteurs.

Analyse de l'efficacité visuelle et du niveau de certitude perçues des cartes vis-à-vis des résultats obtenus aux tâches T3 et T4 et aux taux de mémorisation correcte

À ce stade de l'analyse, nous avons cherché à estimer l'existence d'une relation entre les notes attribuées aux critères d'efficacité visuelle et de certitude par les participants (Figure 116c, d) vis-à-vis du pourcentage moyen de bonnes réponses des tâches T3 et T4 (Figure 116a) et des taux de mémorisations correctes (Figure 116b). *A priori*, il semble qu'il y ait eu un lien entre les notes attribuées à ces deux critères et le pourcentage moyen de bonnes réponses aux tâches d'analyse visuelle T3 et T4. La carte **#2** (surface au bâti) par exemple a atteint les moins bons résultats aux tâches de localisation des dommages (T3) et de leur estimation à un point donné (T4). Cette carte a proportionnellement été moins bien notée par les participants en ce qui concerne son efficacité visuelle et le niveau de certitude attribué à leurs réponses. Pour les cartes les moins bien notées pour ces critères (cartes **#2** et **#6**), les seuils de correspondance ≥50% ont regroupé moins de 20% de taux de mémorisation correcte. Il est possible que la charge d'information plus importante de ces cartes ait pu nuire à la capacité de mémorisation des participants (cf. Figure 114, b). De plus, les résultats des tâches d'analyse visuelle et de mémorisation pour la carte **#5** (semi-régulier de points) ont également corroboré le lien avec cette perception.

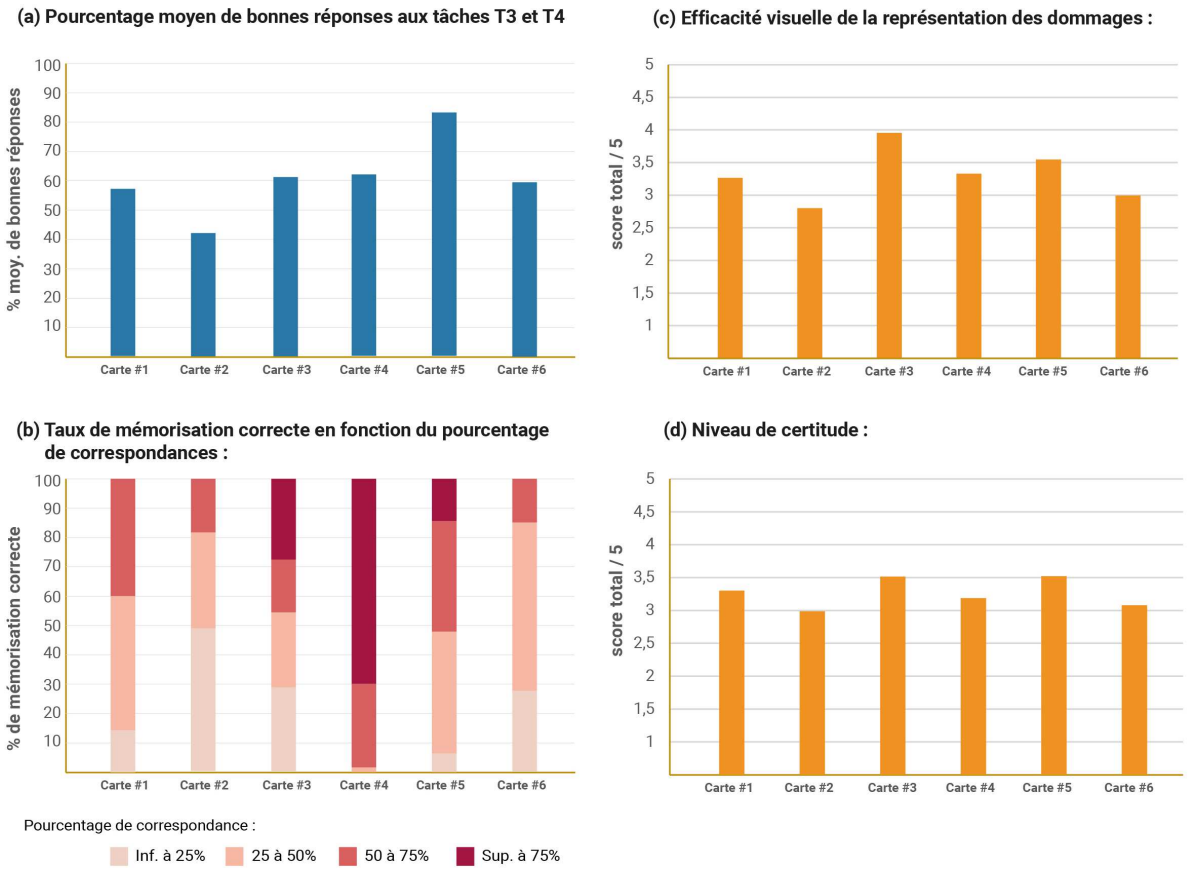


Figure 116 : Pourcentage moyen de bonnes réponses à la tâche T3 et T4(a), de taux de mémorisation correcte en fonction du pourcentage de correspondances (b) face aux notes obtenues aux critères d'efficacité visuelle (c) et au niveau de certitude (d) pour chaque carte (expérimentation #2)

Néanmoins, cette relation a été moins évidente pour la carte **#4** (densité). En moyenne, elle a été moins bien notée vis-à-vis des cartes **#3** et **#5** alors que les résultats obtenus aux tâches d'analyse visuelle T3 et

de mémorisation étaient supérieurs. Cela peut s'expliquer par les effets visuels plus diffus de la technique de densité qui ont d'ailleurs été sujets à des taux d'erreurs plus importants dans l'analyse visuelle (cf. supra 9.2.2).

Si au regard de cette première lecture une relation entre ces paramètres (résultats & préférences) semble exister, l'analyse a tout de même été approfondie afin de confirmer cette tendance. Les pourcentages de bonnes réponses les plus bas de chaque participant ont été répertoriés pour chaque carte et comparés avec les notes attribuées aux critères d'efficacité et de certitude. Ce croisement a montré que pour respectivement 48% et 45% des cas, l'efficacité et le niveau de certitude ont été sur-évalués compte tenu des résultats obtenus. A contrario, 20% des participants en moyenne, ayant obtenu de bons résultats à l'ensemble des tâches, ont sous-évalué ces deux critères. Ce constat est intéressant puisqu'il met en évidence des paramètres subjectifs qui peuvent influencer la perception de l'efficacité et le niveau de certitude que les participants ont accordé pour chaque carte. La carte **#3** (blocs-urbains) a été particulièrement sujette à cette sur-évaluation. 72% des participants ayant obtenu les moins bons résultats ont attribué des notes supérieures ou égales à 4/5. Comme le laissent à penser les notes attribuées au critère de charge d'information, il semble alors que la simplicité et la capacité d'agrégation visuelle de cette technique ont pu entrer en jeu dans l'appréciation de la représentation.

Par ailleurs, le niveau de certitude a également été confronté au pourcentage moyen de réponses hors sujets correspondant aux réponses « par défaut » et aux mauvaises réponses des tâches T4 (T4.1 : estimer le niveau de dommages ; T4.2 : estimer la quantité de bâtiments touchés). Pour 46% des cas en moyenne, les participants ont sur-évalué les cartes impliquant des représentations strictement quantitatives (cartes **#1, #3** et **#4**) ou qualitatives ordonnées (carte **#6**). Le niveau de certitude n'a donc pas été directement influencé par l'incapacité à fournir une réponse non ambiguë à l'une de ces tâches. Il est apparu notamment que 62% des participants ayant fourni des réponses hors sujets à la carte **#3** (blocs urbains) ont considéré que leur analyse était bonne (4/5) à très bonne (5/5). De la même manière, près de 45% de ces participants ont attribué une note de 4/5 *a minima* pour la carte **#1** (carroyage). Notons toutefois que ces participants semblaient moins certains pour les cartes **#2** et **#6** (entre 34 et 39% des notes dépassent 4/5). Il s'agissait des cartes ayant obtenu les moins bonnes notes au niveau de certitude. Il est donc apparu difficile d'affirmer si le manque d'information quantitative ou qualitative a eu des conséquences sur l'interprétation des participants. En outre, la comparaison avec les observations précédentes a démontré que les cartes perçues comme plus efficaces ont également été celles qui admettaient un taux plus important de mauvaises réponses aux tâches T4.

À ce stade, la carte **#3** a bénéficié d'une meilleure estimation des participants. Toutefois cette perception s'est révélée contradictoire au regard des résultats obtenus aux différentes tâches. Ce constat nous pousse à réfléchir à d'autres paramètres subjectifs susceptibles d'influencer ces préférences. La carte **#5** a offert un bon compromis entre sa perception et les résultats obtenus aux différentes tâches d'analyse visuelles et de mémorisation. La carte **#4**, quant à elle, a subi une sous-évaluation de ces capacités compte tenu des résultats qu'elle a obtenus.

9.3. Synthèse de l'expérimentation #2

Les résultats de l'expérimentation #2 ont témoigné de manière générale d'une plus grande efficacité des méthodes d'agrégation statistiques (cartes **#1, #3, #4, #5 et #6**) vis-à-vis de la représentation des dommages à la surface des bâtiments (carte **#2**). Les techniques de densité (carte **#4**), de semi-régulier de points (carte **#5**), de blocs urbains (carte **#3**) et dans une moindre mesure de carroyage (carte **#1**) ont eu de meilleurs résultats lors de l'estimation des secteurs les plus touchés et de leur mémorisation. En outre, ces cartes ont obtenu les meilleures notes concernant la charge d'information. Ces observations tendent à valider l'hypothèse 1 (H1). Néanmoins, elles témoignent aussi d'une efficacité différente entre les méthodes d'agrégation statistique, malgré des niveaux de connaissances en cartographie élevés chez certains participants. De fait l'hypothèse 2 (H2) n'est pas validée. Les seuils de mémorisation correcte pour les niveaux « bon » et « excellent » ou encore les « forces de secours » sont variables en fonction des modes de représentation. L'interpolation se montre moins performante lorsqu'il s'agit de mémoriser les secteurs les plus touchés notamment. Les blocs urbains font ressortir des zones non concernées lorsque les participants ont un niveau « excellent ». Toutefois, ces résultats ont pu être influencés par la dispersion ou la concentration des dommages sur certaines cartes ce qui représente une des limites du protocole à ce stade de nos travaux.

De manière générale, la facilité d'analyse et de mémorisation d'une carte a entraîné des conséquences sur l'estimation de son efficacité visuelle par les participants. Les cartes ayant obtenu de moins bons résultats (analyse visuelle et mémorisation) comme l'interpolation (carte **#6**) ou les surfaces au bâti (carte **#2**) ont été réciproquement moins bien notées pour leur efficacité visuelle. Toutefois, nous avons vu que cette relation n'était pas si simple. La carte **#4** (densité) a été moins bien notée pour son efficacité visuelle vis-à-vis des résultats obtenus aux tâches de localisation des secteurs les plus touchés et leur mémorisation. Ces observations valident donc partiellement l'hypothèse 3 (H3). Ainsi, au-delà des perceptions et des capacités individuelles, il existe une logique commune qui fait ressortir certaines représentations à la fois efficaces dans la manière d'être interprétée, mémorisée ; et pour lesquels les participants ont apprécié la capacité visuelle. Conformément aux résultats de l'expérimentation #1, des erreurs d'interprétation ont pu être recueillies pour les tâches T4.1 (estimer les niveaux de dommage) et T4.2 (estimer la quantité des bâtiments touchés) validant ainsi l'hypothèse 4 (H4). Malgré l'absence d'information, les participants ont répondu à ces tâches sans que cela nuise à la certitude de leur analyse. C'est notamment le cas pour les cartes **#3** (blocs urbains) et **#1** (carroyage). Néanmoins, les cartes **#2** (surface au bâti) et **#6** (interpolation) ont obtenu respectivement les moins bonnes notes au critère de certitude. Ce constat corrobore le fait qu'une technique moins efficace pour l'ensemble des tâches engendre une diminution du niveau de certitude des participants. Compte tenu de ces résultats, la représentation du semi-régulier de points (carte **#5**) fournit un compromis intéressant entre ses capacités d'analyse visuelle, de mémorisation, mais également de perception par les utilisateurs, quel que soit leur niveau en cartographie. Cette représentation se démarque notamment des cartes **#3** et **#4** compte tenu de la dispersion plus importante des données à chercher. Cette distribution de la donnée fera l'objet d'une analyse plus fine dans l'expérimentation suivante. À ce stade, les capacités des variables visuelles (taille et couleur) de Bertin (***1972***) semblent optimiser la lecture, la compréhension et l'intégration d'une image cartographique sans avoir forcément de connaissances antérieures des modes de représentation.

Chapitre 10 : Expérimentation #3, évaluation des capacités sensorielles des représentations des dommages

10.1. Définir les capacités sensorielles des représentations des dommages *post*-catastrophes pour un groupe d'utilisateurs homogènes

10.1.1. Protocole de l'expérimentation #3

Hypothèses de départ :

Les expérimentations précédentes ont démontré que l'interprétation et la mémorisation des informations pouvaient être plus ou moins facilitées par des techniques d'agrégation. De manière générale, les méthodes qui résumaient statistiquement la donnée ont été plus efficaces que les techniques d'implantation sur le bâti. Néanmoins, certaines techniques en particulier, comme la densité et les blocs urbains, ont bénéficié d'une meilleure mémorisation que le carroyage et l'interpolation par exemple**. Ce constat implique donc qu'au-delà du niveau d'abstraction de la donnée, il existe des processus cognitifs et visuels qui vont favoriser les actions d'évaluation de la carte et son schéma cognitif.** En outre, l'expérimentation #2 a soulevé l'importance de la distribution spatiale des données pour la facilité à la fois à les traiter et à les mémoriser. À ce stade du protocole général, qui vise à tester les capacités cognitives et sensorielles du semi-régulier de points proportionnels, il est important d'approfondir nos connaissances sur l'impact visuel des différentes techniques décrites précédemment. Pour cela, nous avons souhaité étudier le principal récepteur qu'est la vision, sur un échantillon de participant à la connaissance et à la formation homogène, en employant les technologies de l'Eye-tracking. Dès lors nous avons formulé plusieurs hypothèses :

- Hypothèse 1 (H1) : Conformément à l'état de l'art et à la mise à plat des représentations cartographiques de cette expérimentation (#3), les techniques qui regroupent la donnée seront plus efficaces visuellement que les points sur le bâti.

- Hypothèse 2 (H2) : Néanmoins, les particularités visuelles des techniques qui utilisent des combinaisons significatives (taille et couleur / couleur et densité) devraient donner de meilleurs résultats vis-à-vis des autres techniques qui utilisent deux couches pour présenter la même information.

- Hypothèse 3 (H3) : Compte tenu des résultats de l'expérimentation précédente (#2), l'implantation géographique semble jouer un rôle dans la perception de la donnée. Les résultats obtenus aux tâches de localisation et l'analyse des données oculométriques devraient mettre en avant une plus grande difficulté des participants à trouver les réponses attendues pour les données plus dispersées.

- Hypothèse 4 (H4) : En considérant les capacités visuelles de la forme hexagonale, l'utilisation de cette dernière devrait améliorer la lisibilité des techniques vis-à-vis de celles qui utilisent la forme carrée.

- Hypothèse 5 (H5) : Pour finir, l'expérimentation #2 a démontré que les participants avaient globalement attribué de meilleures notes à l'efficacité visuelle des cartes pour lesquelles ils avaient de meilleurs résultats, et inversement. Une telle corrélation devrait être observable entre les notes attribuées par les participants aux critères d'esthétisme et d'efficacité.

Les représentations analysées :

À la différence de l'expérimentation #2, l'objectif a été de comparer plusieurs représentations cartographiques permettant de visualiser simultanément la densité de bâtiments ainsi que les niveaux d'intensités de dommages observés. De fait, la présence essentielle de cette double information contraint les techniques testées. La Figure 117 présente les six techniques testées, leur classification ainsi qu'un échantillon des cartes testées**.** L'échantillon comportait la technique des points au bâti, le carroyage (décliné en hexagone et en carré), le semi-régulier de points proportionnels (décliné en hexagone et en carré), puis l'interpolation IDW (cf. Annexe 9). À noter que les blocs urbains n'ont pas été intégrés dans cet échantillon. Contrairement aux autres techniques qui ont uniquement mobilisé des données ponctuelles de dommages implantées sur le bâti, l'utilisation des blocs urbains est contrainte par l'intégration d'autres types de données, notamment le réseau routier. De plus, cette technique implique une distribution des dommages trop différente des autres techniques, ce qui introduit des biais dans l'analyse. Toutes les cartes sont produites à des échelles similaires (1 :25 000). Les spécificités de chacune de ces visualisations sont rappelées brièvement :

- Les points au bâti (***P***) : Cette technique est utilisée pour visualiser la distribution spatiale et mesurer les densités d'un grand nombre d'objets individuels en ayant pour avantage d'afficher l'emprise d'origine de la donnée (***Hey & Bill, 2014***).
- Le carroyage, carré (C_c) et hexagonal (C_h) : Pavage constitué de mailles identiques et réparties de manière homogène. Deux formes sont proposées pour le carroyage : le carré et l'hexagone. Cette distinction a pour objectif de tester les avantages visuels de la forme hexagonale vis-à-vis d'une structure plus traditionnelle. Les mailles ont des dimensions différentes compte tenu de leurs géométries. Elles sont de *150m×150m* pour les formes carrées et de 150m×173m pour les formes hexagonales. Ces dimensions assurent une finesse compatible avec l'échelle des cartes à produire (1 : 25 000).
- Le semi-régulier de points proportionnels, carrés (SRP_c) et hexagonaux (SRP_h) : Cette technique utilise le centroïde des mailles du carroyage décrit précédemment pour indiquer le niveau de dommage et le nombre de bâtiments. Ces informations sont transmises respectivement par les variables visuelles de couleur et de taille. Comme pour le carroyage, deux types de formes sont utilisés afin de produire deux gammes de visualisations : le carré et l'hexagone.
- L'interpolation IDW (***IDWI***) : La technique d'interpolation spatiale Inverse Distance Weighing (IDW) est couramment utilisée dans les cartes de dommages. Les dommages des bâtiments sont calculés à partir de la moyenne pondérée des entités dans un rayon de recherche de 200 mètres.



Figure 117 : Listes des techniques visuelles évaluées et exemples de représentations cartographiques (cf. annexe 9) (expérimentation #3)

Les cartes soumises aux participants ont été harmonisées manuellement (échelle de visualisation, format, couleur, mise en page, etc.) sur la base des informations vectorielles récupérées auprès des services producteurs. Ce travail d'uniformisation des supports graphiques a été nécessaire afin d'assurer la calibration et la fiabilité de l'analyse des résultats issus de l'Eye-tracking. Les représentations cartographiques contenaient un fond de carte identique sur lequel les zones maritimes sont représentées à l'aide d'un bleu clair ; les zones d'étude à l'aide d'un gris moyen et les autres zones terrestres à l'aide d'un gris plus foncé. Le gris a été choisi, car il favorise des degrés de saturation similaires. Il a servi de lien neutre entre les couleurs limitant ainsi leur discrimination (***Itten, 1967; Sève, 2009***). Hormis le fond de carte, les visualisations contenaient une ou deux couches afin de dispenser des informations quantitatives et qualitatives équivalentes. Pour les points (**P**) et les semi-réguliers de points (**SRP**), la densité de bâtiments et le niveau de dommage sont représentés à l'aide d'une seule couche. Pour les autres techniques (carroyage et interpolation), une première couche contient une implantation ponctuelle des bâtiments et une seconde, semi-transparente, montre les niveaux (intensités) de dommages. Ces derniers sont toujours représentés à l'aide des mêmes couleurs : jaune clair pour un faible niveau de dommage, orange pour un niveau intermédiaire et rouge pour un niveau élevé, et ce quel que soit la technique. Ces couleurs ont été choisies à partir de l'outil de diagnostic *Color Brewer* afin de générer une palette de couleurs optimales à la distinction visuelle des niveaux de dommages, quel que soit le type d'écran ou encore le daltonisme du participant (***Harrower & Brewer, 2003***).

Dans cette expérimentation, les cartes ont été construites à partir de quatre jeux de données portant chacun sur une zone géographique différente. Ce choix est conditionné à la fois par l'obligation de faire varier les secteurs à analyser, afin de limiter la redondance cognitive, mais également de mesurer l'influence de la position des données (dispersées ou concentrées). Chaque jeu de données illustre un événement important (Tableau 15).

Tableau 15 : Secteurs géographiques et jeux de données utilisés pour l'expérimentation #3

Secteurs géographiques	**Type de catastrophe**	**Source des données**	**Années**
Secteur 1 - Indonésie (Palu)	Séisme & tsunami	Copernicus EMSR 317 [35]	2018
Secteur 2 - La Dominique (Saint-Joseph)	Ouragan (Maria)	Copernicus EMSR 246 [36]	2017
Secteur 3 - Saint-Martin (Marigot-Baie Nettlé)	Ouragan (Irma)	Copernicus EMSR 232 [37]	2017
Secteur 4 - Haïti (Port-au-Prince-Carrefour)	Séisme	UNOSAT-UNITAR [38]	2010

Ces quatre jeux de données ont permis de construire 24 cartes à l'aide des six techniques de visualisation décrites ci-dessus. Les cartes sont composées d'une toponymie simplifiée à l'aide de lettres facilitant la nomination des secteurs lors de la réalisation des différentes tâches. Chaque carte a été accompagnée d'un encart pour le titre, d'une légende, d'une échelle graphique et d'une orientation vers le Nord.

[35] *https://emergency.copernicus.eu/mapping/list-of-components/EMSR317*
[36] *https://emergency.copernicus.eu/mapping/list-of-components/EMSR246*
[37] *https://emergency.copernicus.eu/mapping/list-of-components/EMSR232*
[38] *http://learningfromearthquakes.org/2010-01-12-haiti/11-resources/92-new-unosat-damage-assessment-carrefour-haiti-database-esri-and-kml-format*

Ces éléments sont apparus essentiels à conserver, car ils participent à maintenir l'aspect cartographique des visualisations testées.

Utilisateurs mis à l'étude :

L'expérimentation a été menée auprès d'un échantillon de 24 participants. À l'instar de l'expérimentation #1, les participants sont issus d'un master spécialisé dans la gestion des catastrophes et des risques naturels, étudiants en seconde année du master. L'échantillon comprenait 9 femmes et 15 hommes dont la moyenne d'âge était de 24.6 ans (âge minimum 22 ans et maximum 39 ans).

Les tâches à accomplir :

Tout comme la précédente expérimentation (#2), les tâches à accomplir sont orientées vers des actions de localisation et d'estimation des dommages (Figure 118). Les tâches de localisation (T1) ont consisté à localiser (localisation) les *k* régions prédéterminées dont le niveau de dommage est élevé et qui concentrent une importante quantité de bâtiments (T1.1). Une seconde tâche a consisté à localiser les secteurs présentant de forts dommages, mais cette fois sur une faible quantité de bâtiments (T1.2). Cette différence est volontairement intégrée à l'expérimentation afin d'estimer les capacités du semi-régulier de points proportionnels à distinguer les informations pour les zones à faible densité de bâtiments. Ce choix accompagne les retours d'expériences selon lesquels, la priorité n'est pas forcément d'intervenir dans les zones à plus forte densité. À titre d'exemple, une route coupée vers un ensemble de bâtiments peu nombreux, mais isolé peut avoir de lourdes répercussions. Les tâches d'estimation (T2) ont consisté à relever le niveau de dommage (T2.1) et la quantité de bâtiments impactés (T2.2) à des points précis de la carte (*r*). Ces deux tâches (T1 et T2) ont fait l'objet d'une capture de l'activité de l'œil au moyen d'un Eye-tracker. Ce dernier a été intégré afin d'analyser les temps d'affichage des cartes (équivalent au temps de réponse des tâches) et de mesurer les durées de fixation et le taux de passage du regard des participants pour chaque pixel de l'écran grâce à un capteur infrarouge (cf. plus loin dans la section).

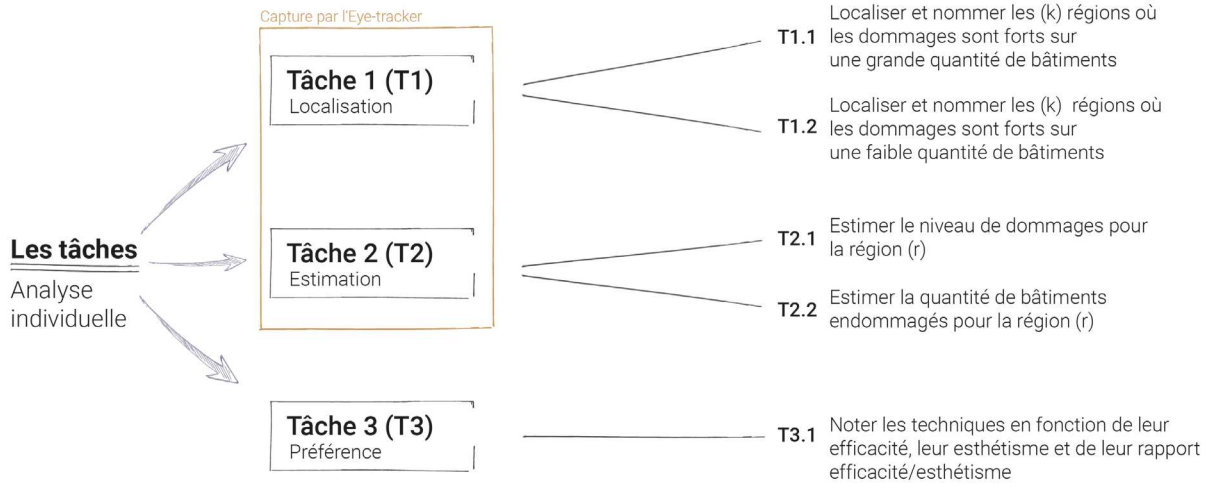


Figure 118 : liste des tâches à accomplir pour l'expérimentation #3

Les paramètres des tâches (*k* pour T1 et *r* pour T2) ont été déterminés par des scientifiques, spécialisés en analyse spatiale et cartographie, pour chaque jeu de données afin d'identifier les réponses attendues. Ils ont été utilisés pour l'analyse de la validité des réponses présentées ci-après. Pour finir, il a été demandé aux participants de répondre à une tâche complémentaire (T3). Elle consistait à noter de 1 (très mauvaise) à 5 (très bonne) les techniques en fonction de leur niveau d'efficacité, d'esthétisme et de leur rapport (efficacité/esthétisme).

La procédure :

La procédure générale de cette expérimentation a été déclinée en 3 phases. La première a consisté à réaliser de manière systématique un test sur la perception des couleurs. Il s'agissait de faire ressortir d'éventuels cas de dyschromatopsie colorimétrique et de garantir la fiabilité des résultats. Il a été réalisé à partir du test chromatique d'Ishihara (***Ishihara, 1918***). Celui-ci a permis d'analyser la perception des couleurs afin de détecter toutes formes de daltonismes par l'intermédiaire d'une série de résultats donnés. Ce dernier a été simple et rapide à exécuter. Il est composé de 38 planches regroupées en 7 sections dont quelques exemples sont illustrés en Figure 119. Chaque section permet de se concentrer sur les niveaux de déficiences colorimétriques (protanopie, dyschromie, etc.), à l'exception de la première dont les résultats doivent être identiques pour toutes les personnes, même déficientes. Les résultats n'ont fait état d'aucun problème de perception colorimétrique pour l'ensemble de l'échantillon. Cette phase a été suivie d'une présentation de l'étude utilisateur et de sa configuration. Il s'agissait d'optimiser l'intégration du protocole afin d'éviter au maximum les erreurs de manipulation du participant et de capture de l'Eye-tracker.

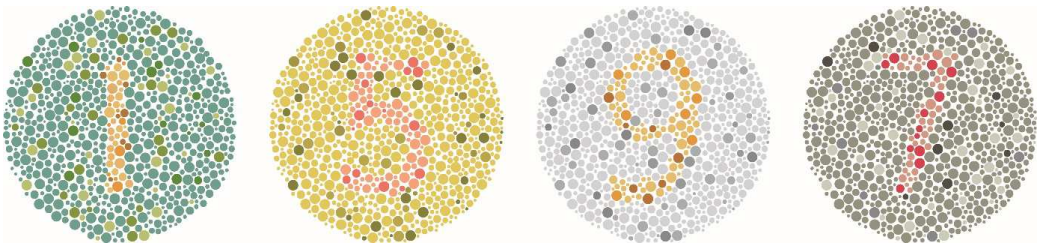


Figure 119 : Extrais des tests d'Ishihara pour la détection des sujets dyschromates et protanopes (chiffre : 1 – 5 – 9 – 7) (expérimentation #3)

La phase d'analyse visuelle consiste à tester les six techniques [$\boldsymbol{P; C_c; C_h; SPR_c; SRP_h; IDWI}$] présentées précédemment en fonction de leur implantation sur quatre secteurs d'études et à travers la réalisation de quatre tâches [T1:1 ; T1:2 ; T2:1 ; T2:2]. Au total, 96 essais devaient être effectués. Afin de maintenir la concentration des participants, nous avons décidé de fixer 36 essais pour chacun d'eux. En effet, une étude pilote, réalisée au préalable avec 4 participants supplémentaires, a démontré que les 36 essais pouvaient être réalisés en 20-25 minutes environ. Cette procédure a été réalisée afin de garantir la pertinence des résultats de cette expérimentation.

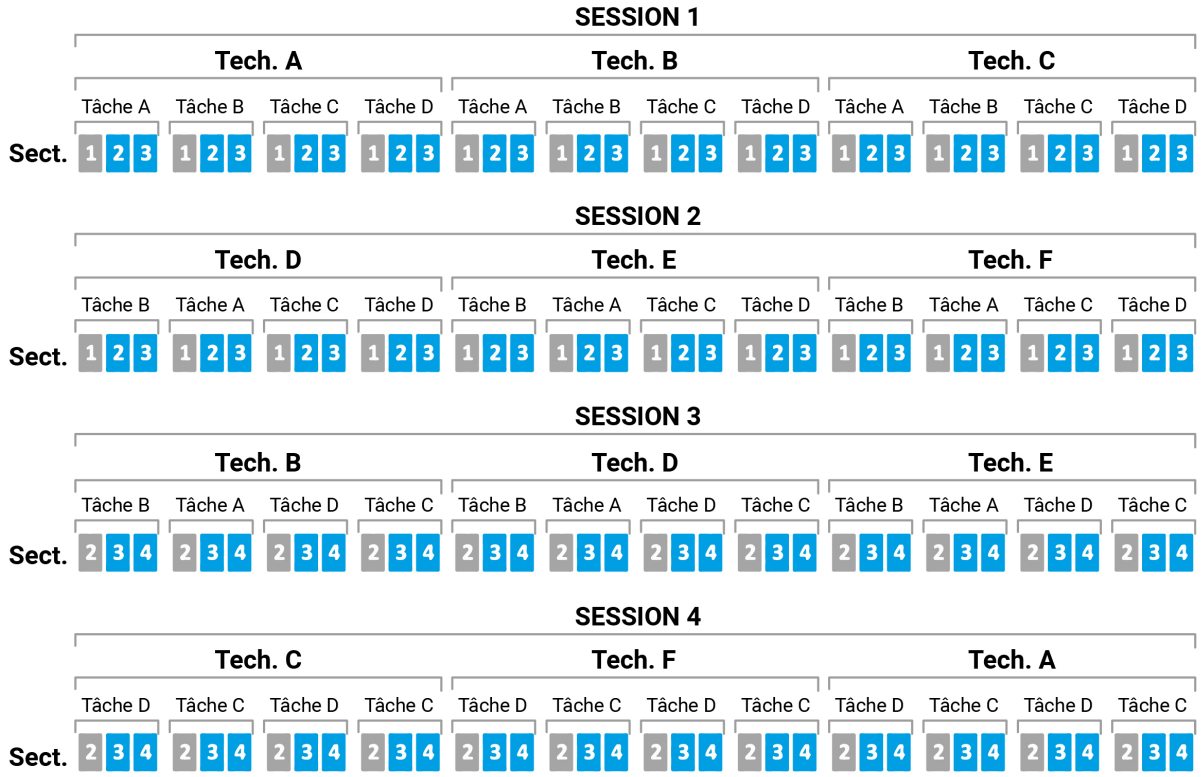


Figure 120 : Méthode standard de la distribution des essais, dite du carré latin (expérimentation #3)

La distribution des essais s'est basée sur un plan d'étude intra-sujet à partir de trois variables primaires. Il se traduit par l'analyse visuelle de 3 techniques pour 4 tâches sur 3 secteurs géographiques différents, et ce pour chaque participant. Compte tenu de ces contraintes sur le nombre d'essais à effectuer (96) et des possibilités par participants (36), nous avons suivi une procédure inspirée par Lobo et al., (***2015***) pour déterminer l'ensemble des 24 séquences[39] qui permettaient un traitement adéquat des données (Figure 120). Ainsi, les essais d'une session ont été regroupés en trois blocs, soit un bloc par technique visuelle. Comme chaque session impliquait trois techniques alors que six étaient disponibles, nous avons sélectionné et ordonné les techniques par session comme suit. Un carré latin a donné six gammes ordonnées des six techniques. Ce processus a été répété deux fois, ce qui donne douze gammes ordonnées au total. Par la suite, chaque gamme a été divisée en deux pour produire vingt-quatre gammes de techniques, soit une par session. De cette façon, des paires de participants consécutifs ont effectué des essais sur les six techniques, soit trois chacun. De plus, ils avaient les mêmes secteurs géographiques. L'ordre des secteurs géographiques a été modifié de manière à avoir des territoires différents entre les différentes paires de participants. Cette procédure a été nécessaire afin d'assurer un contrepoids utile aux traitements des données. Le premier essai de chaque paire (techniques × tâches) a été considéré comme un essai d'entraînement (sur fond, Figure 120), tandis que la précision et le temps d'exécution des deux derniers ont été enregistrés pour les autres (sur fond bleu, Figure 120).

[39] Séquence désigne ici un ensemble ordonné d'essais pour un participant

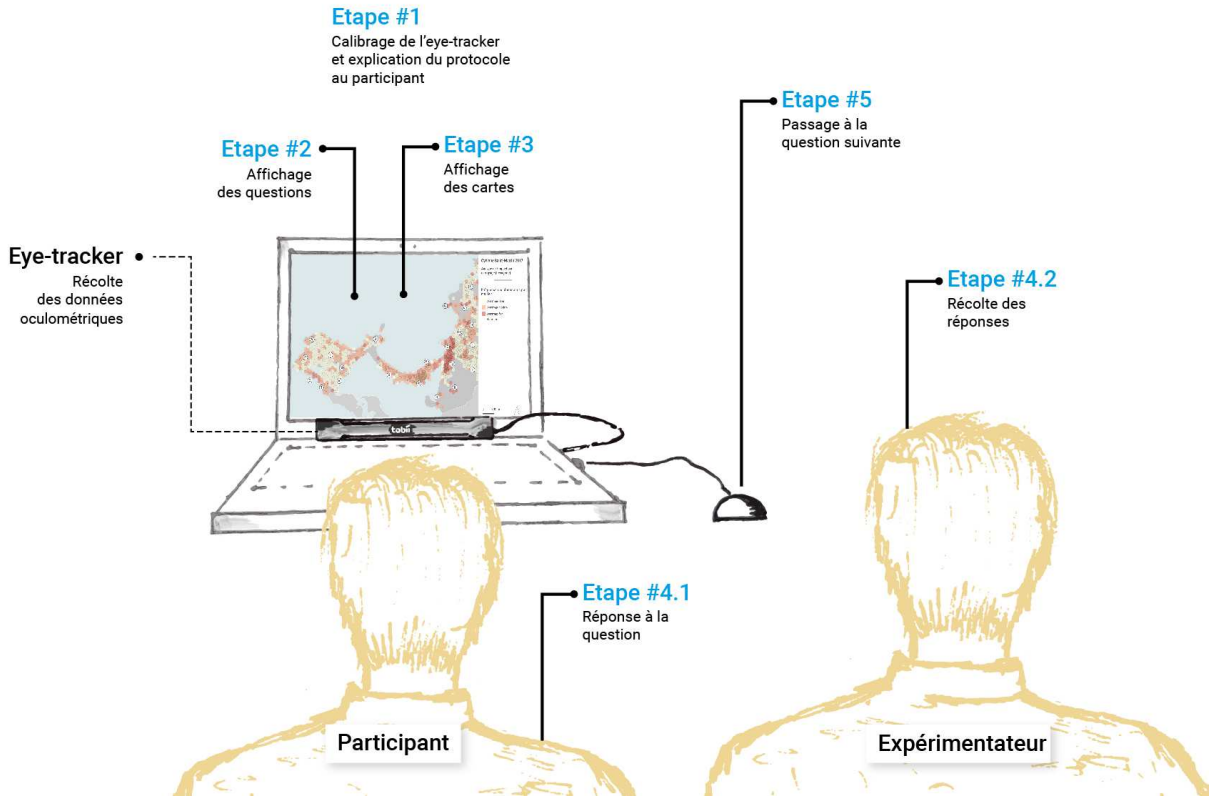


Figure 121 : Configuration de l'expérimentation #3

Pour réaliser cette phase, chaque participant est passé individuellement devant un poste de travail équipé du logiciel d'Eye-tracker (Figure 121). Ce logiciel (cf. infra 10.1.2) mesure le mouvement des yeux de l'utilisateur situé devant le traqueur en utilisant notamment la zone fovéale décrite dans l'état de l'art (cf. supra 4.1.1). Les données récoltées par ce dernier permettent d'identifier les zones de l'image support que l'étudiant a regardé, à quel moment, pendant combien de temps et de suivre la trajectoire des yeux durant l'accomplissement d'une tâche spécifique. Une fois l'utilisateur installé face à l'ordinateur, une visualisation de la position des yeux a permis d'ajuster la distance et l'orientation de l'écran. Ensuite, une calibration a été effectuée afin d'assurer la bonne capture du mouvement des yeux pour les différents participants. Une fois cette étape terminée, la séquence était lancée et l'enregistrement oculométrique pouvait débuter. Un écran montrait la question liée à la tâche à accomplir. Ensuite, le participant devait cliquer sur l'écran pour afficher la carte (résolution 1920*1080) et répondre à la question. Chaque participant testé commençait par un essai afin de valider le protocole de réponses. Il devait ensuite cliquer à nouveau pour passer à la carte suivante lorsqu'il estimait la tâche accomplie. Le protocole n'incluait pas de limite de temps. Un expérimentateur était disponible pour répondre aux questions sur la tâche en cas de malentendu et récolter les réponses du participant. Le temps de réalisation des différentes tâches a été enregistré à partir de la durée d'affichage de la carte étudiée sur l'écran jusqu'au clic. La durée moyenne d'une séance était de 20,5 minutes (min : 14,9, max : 31,5 minutes).

À la fin de chaque session, l'ensemble des 6 techniques a été présenté aux participants sur un même secteur géographique (issu du *S2*).

Il leur a été demandé de noter les techniques selon trois critères. Le premier concerne le sentiment d'efficacité vis-à-vis de l'exécution des tâches, le second le niveau d'esthétisme et le troisième le rapport perçu entre efficacité et esthétisme. Les notes ont été classées de 1 "très mauvaises" à 5 « très bonnes ». Enfin, il a été demandé à l'utilisateur d'évaluer son degré de fatigue visuelle à la suite de la séance.

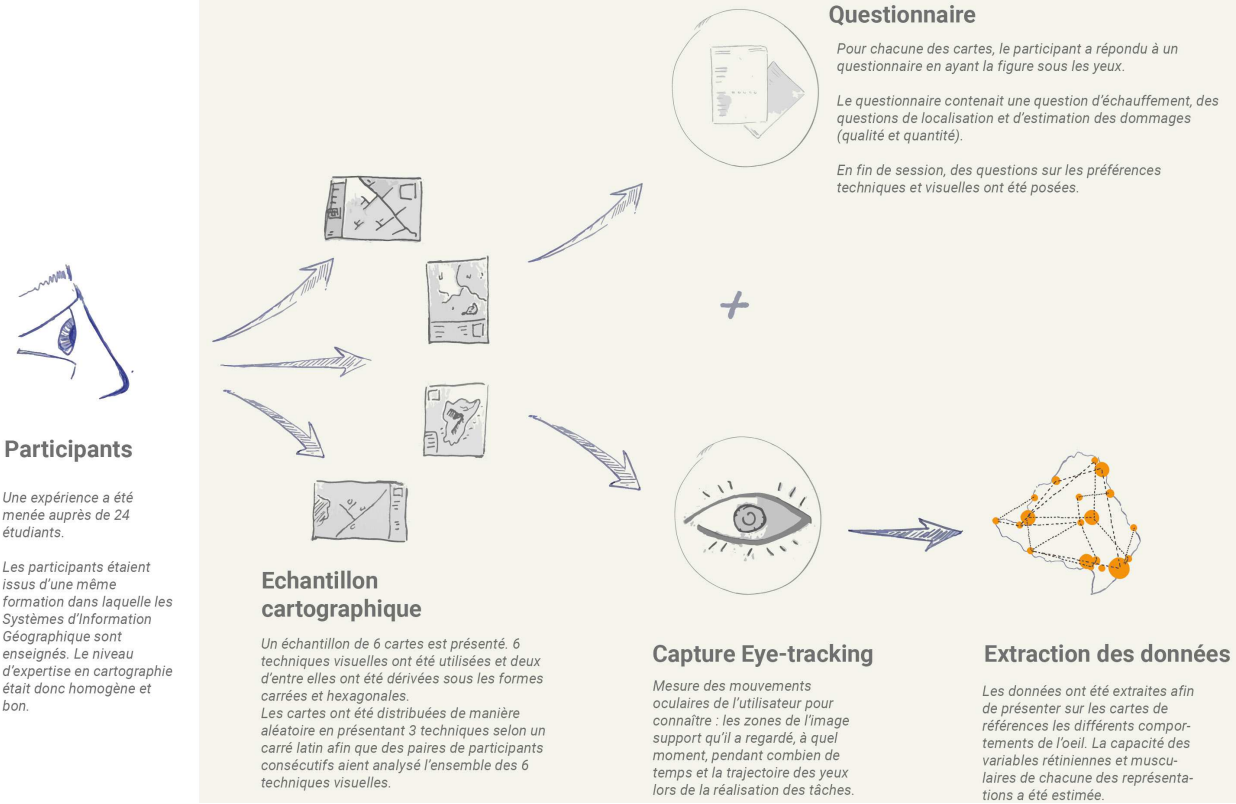


Figure 122 : Synthèse de la procédure de la phase active de l'expérimentation #3

10.1.2. Traitement et exploitation des résultats de l'expérimentation #3

Base de données et traitement des réponses aux questionnaires :

Cette procédure a donné 24 (étudiants)×3 (techniques)×4 (tâches)×3 (secteurs) = 864 essais dont, 288 essais d'entrainement et 576 essais enregistrés utilisés pour l'analyse. Le contrepoids assuré par la mise en place du carré latin a permis de garantir la réalisation des 96 combinaisons possibles entre les techniques, les tâches et les secteurs géographiques, soit neuf essais par des participants différents dont six ont été enregistrés. Pour chaque essai, deux mesures ont été obtenues : un temps de réalisation et un score de précision. Pour les tâches de localisation (T1), ce score est transcrit par un pourcentage de 0 à 100, correspondant au pourcentage de bonnes réponses. Par exemple, un participant peut avoir trouvé 4 des 10 secteurs attendus, il a donc 40% de bonnes réponses. Pour les tâches d'estimation (T2), ce score a été défini selon une logique binaire de 100 ou de 0. Il retranscrit le fait que le participant a bien évalué le niveau de dommages/la quantité des bâtiments ou non. Le traitement des résultats statiques de cette expérimentation (#3) a été appuyé par un statisticien (C. Lavergne) de l'Université de Paul-Valéry, Montpellier 3.

Récolte du suivi oculométrique et exploitation :

Les données ont été collectées par le système d'oculométrie Tobii X2-60 avec une fréquence de 60Hz. Le traqueur mesure la position de l'œil toutes les 16,67 millisecondes, soit 3600 points par minutes. Ainsi pour une session de 25 minutes nous obtenons environ 90 000 mesures. L'Eye-tracker est connecté à un ordinateur portable Windows, doté d'un processeur Intel Core i7-4710MQ Quad Core à 2,5 GHz, d'une mémoire RAM de 16Go et d'une carte graphique NVIDIA Quadro K3100M. L'écran, de 17,3 pouces, de résolution 1920 x 1080. Le protocole de test, la collecte des données et leur traitement ont été réalisés avec le logiciel Tobii Sutdio Professional version 3.4.8.

À partir de ces données, les différentes stratégies visuelles des participants et les durées de fixation/taux de passage ont pu être exploitées pour chacune des cartes. Les données oculométriques de chaque participant ont été regroupées par technique et par secteur géographique. Ce traitement a permis d'extraire des cartes de chaleurs renseignant les zones de fortes activités du regard de tous les participants pour chacune des cartes. Ces zones ont ensuite été comparées à la localisation des bonnes réponses attendues pour T1.1. Il s'agit d'estimer les zones de forte concentration conformes ou non à la localisation des secteurs à fort niveau de dommages et en grande quantité.

10.2. Résultats de l'expérimentation #3

10.2.1. Résultats de la phase d'analyse visuelle des participants : traitements statistiques

Cette section présente les résultats et les temps impartis à la réalisation des différentes tâches. Les techniques sont rappelées par la Figure 123.

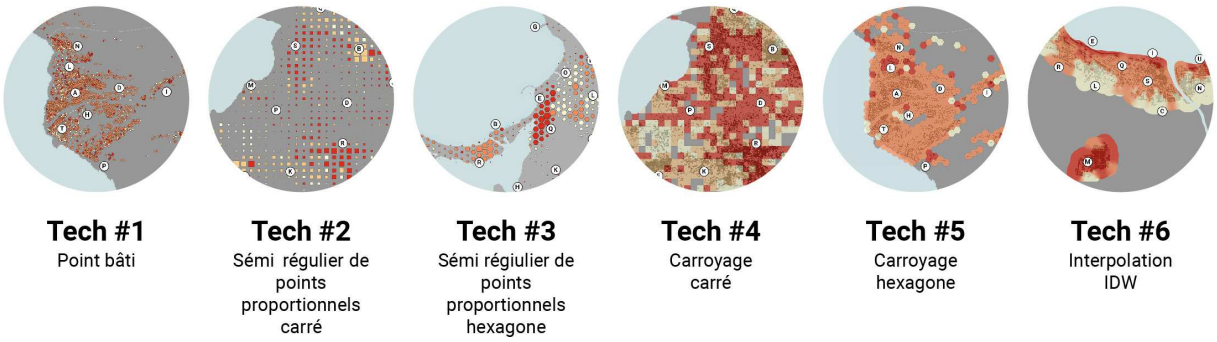


Figure 123 : Rappel des techniques testées dans l'expérimentation #3

Analyse visuelle : appréciation synoptique de la donnée

- **<u>Tâche 1 - Localiser les secteurs à forts niveaux d'endommagement (T1) :</u>**

Les résultats obtenus pour les tâches T1, correspondant à la localisation des secteurs à fort dommage pour un grand nombre (T1.1) et un faible nombre (T1.2) de bâtiments, sont illustrés en Figure 124. Pour chaque tâche et technique, la moyenne et l'intervalle de confiance sont affichés (Figure 124, a) et

déclinés en boite à moustache afin d'identifier le minimum, le premier quartile, la médiane, le troisième quartile et le maximum au moyen de boites à moustache (Figure 124, b) et approfondir nos analyses statistiques.

Ces analyses montrent que les techniques de carroyage carré ($\mathbf{C_c}$) et d'interpolation IDW (IDWI), ont été les moins efficaces pour la première tâche (T1.1). Les taux de bonnes réponses des participants ont atteints en moyenne 65%. Arrive ensuite la technique des points (**P**) qui s'est montrée légèrement plus efficace (71%). Néanmoins, pour ces trois techniques, les pourcentages de bonnes réponses inférieures à 60% représentaient 50% des participants. Les techniques de carroyage hexagonal ($\mathbf{C_h}$) et de semi-régulier de points proportionnels carrés ($\mathbf{SRP_c}$) se sont révélés plus efficaces avec des taux de bonnes réponses moyens respectivement de 76% et 79%. La technique du semi-régulier de points proportionnels hexagonaux ($\mathbf{SRP_h}$) a obtenu les meilleurs résultats (84%). 75% des participants ont fourni un pourcentage de bonnes réponses ≥75%. En poussant l'analyse plus loin, dans les limites[40] d'utilisation d'un modèle statistique pour identifier les différences significatives (type ANOVA ou GLM), la technique des semi-réguliers de points hexagonaux a été significativement meilleure que le **carroyage carré** ($p = 0.0076$) et l'interpolation **IDW** ($p = 0.0107$).

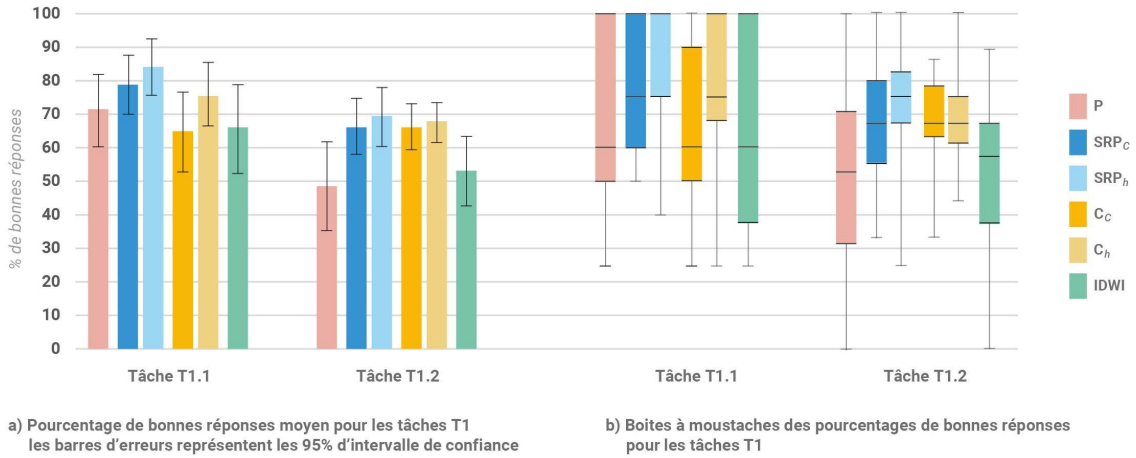


Figure 124 : Pourcentage de bonnes réponses pour les tâches 1 (T1) pour les 6 techniques testées (P : point, SRP_c : semi-régulier de points proportionnels carrés, SRP_h : semi-régulier de points proportionnels hexagonaux, C_c : Carroyage carré, C_h : Carroyage hexagone et IDWI : Interpolation IDW) (expérimentation #3)

Pour la seconde tâche (T1.2), ce sont les techniques de point (**P**) et d'interpolation IDW (**IDWI**) qui sont apparues les moins efficaces. Elles ont obtenu respectivement 48% et 52% de bonnes réponses en moyenne pour une médiane de 53% (**P**) et de 57% (**IDWI**). De plus, la différence entre ces techniques et les autres a été significative dans tous les cas de figure ($p<0.04$). Par conséquent, les techniques basées sur des carroyages (*c.-à-d.* $\mathbf{C_c}$, $\mathbf{C_h}$, $\mathbf{SPR_c}$ et $\mathbf{SRP_h}$) ont offert de meilleurs résultats ($p = 2.48^e - 05$). Ces dernières ont affiché des résultats très proches, notamment pour $\mathbf{SRP_c}$, $\mathbf{C_c}$ et $\mathbf{C_h}$ dont les moyennes sont

[40] L'utilisation d'un modèle statistique pour identifier les différences significatives (type ANOVA ou GLM) pour cette tâche est limitée par la distribution des pourcentages de bonnes réponses qui ne suit pas une loi normale, exponentielle ou autre. Néanmoins un modèle de régression généralisé (fonction *Glm* de *R*) a été testé. Cette modélisation est réalisée dans le même esprit que l'ANOVA, mais peut utiliser une loi de distribution des données non normale (p. ex. binomiale ou exponentielle). Même si pour ce premier cas nous avons utilisé la famille *gaussienne* (loi normale), nous verrons par la suite que ce ne sera pas le cas pour les tâches T2 et sur l'analyse des temps de réponse.

comprises entre 66% et 67%. **SRP_h** a obtenu à nouveau les meilleurs scores (69% en moyenne). Cependant, la différence n'a pas été significative ($p \geq 0.66$). Contrairement à la première tâche (T1.1), il semblerait que le nombre de couches utilisées par les techniques n'a pas eu d'incidence sur les résultats ($p = 0.813$). Il en est de même pour le type de forme qui a été utilisé (carré ou hexagone) pour définir le carroyage ($p = 0.603$).

À partir des premiers résultats, les techniques traitant la donnée grâce à un carroyage ont semblé plus efficaces pour ce type de tâche (localisation des dommages forts). Parmi ces techniques, **SRP_h** s'est montré plus efficace face aux techniques de point et d'interpolation qui ont obtenu en moyenne 59% de bonnes réponses. Cependant, il s'agit d'une vision d'ensemble des résultats et comme nous l'avons émis en hypothèse, la distribution des données peut conditionner les résultats obtenus par les différentes techniques.

- **Tâche 1 - Localiser les secteurs à forts niveaux d'endommagement : Secteurs géographiques**

La Figure 125 présente les résultats des tâches T1 pour chacune des techniques et les différencie par secteur géographique. Ces traitements permettent de distinguer l'homogénéité des résultats obtenus par les participants pour la tâche T1.1 pour les secteurs 1 et 3. Pour ces derniers, les participants ont atteint en moyenne 75% et 98% de bonnes réponses respectivement. Inversement, les secteurs 2 et 4 ont présenté des résultats plus hétérogènes et moins bons pour le secteur 2 (50.6% en moyenne). Pour ces deux secteurs, les techniques de carroyage carré (**C_c**) et d'interpolation IDW (**IDWI**) sont apparus comme les moins performantes. Celles-ci ont obtenu en moyenne 31.5% et 36.25% de bonnes réponses. Viennent ensuite les points (P) avec une moyenne de 48% de bonnes réponses. Le carroyage hexagonal (**C_h**) s'est révélé plus efficace pour le secteur 4 avec une note moyenne de 75% contre 46% pour le secteur 2. Les techniques de semi-régulier de points (**SRP**) se sont montrés plus efficaces dans les deux cas. Néanmoins, le semi-régulier de points hexagonaux (**SRP_h**) a obtenu les meilleures notes (91% en moyenne) aux secteurs 2. Inversement, le semi-régulier de points carrés (**SRP_c**) a été plus efficace pour le secteur 4 (83% en moyenne).

Pour la tâche T1.2. Les résultats se sont révélés hétérogènes pour l'ensemble des secteurs, sauf pour le secteur 4. Sur ce dernier, le taux de bonnes réponses moyen par technique oscille entre 61% et 76%. De manière générale, nous constatons que pour trois des quatre secteurs, au moins une des techniques de semi-régulier de points obtient les meilleurs résultats. Il en est de même pour les techniques de carroyage qui affichent les meilleurs résultats pour le secteur 1. Hormis le secteur 4, les points et les interpolations ont décroché en moyenne les moins bons résultats.

À la vue générale de ces résultats, force est de constater que la distribution des données a une incidence sur les niveaux de réponses observées pour les tâches T1, et en particulier pour T1.1. Les secteurs 1 et 2 sont définis par une plus forte concentration des données à rechercher. La distribution des dommages du secteur 3 par exemple, qui concernait une partie de l'île de Saint-Martin, était proche de celle observée lors de l'expérimentation #2 (cf. supra 9.2.3) et de la carte de densité étudiée (Figure 84). Les résultats se sont montrés plus hétérogènes dès lors que la donnée était plus dispersée comme pour les secteurs 2 et 4.

Cependant, qu'importe le type de distribution des données, la technique de semi-régulier de points, en particulier celle qui utilisait la forme hexagonale (**SRP$_h$**), a obtenu de bons résultats, voire les meilleurs. Les points (**P**), l'interpolation IDW (**IDWI**) et le carroyage carré (**C$_c$**) se sont révélés plus efficaces dès lors que la donnée était spatialement plus concentrée.

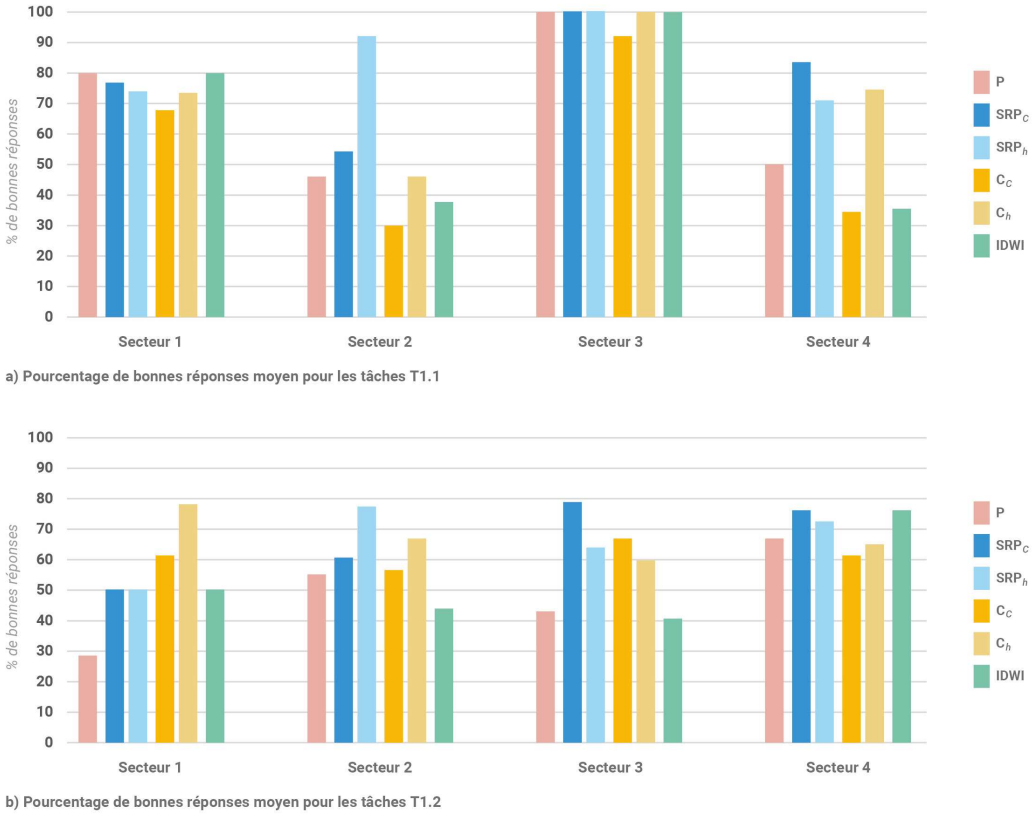


Figure 125 : Pourcentage de bonnes réponses moyen pour la tâche T1.1 (a) et T1.2 (b) en fonction des techniques et des différents secteurs géographiques (expérimentation #3)

Analyse visuelle : appréciation précise de la donnée

- **<u>Tâche 2 - Estimer le niveau de dommages ou la quantité de bâtiments pour un secteur donné :</u>**

La Figure 126 montre le pourcentage moyen de bonnes réponses obtenues aux tâches T2 qui concernent l'identification du niveau de dommage (T2.1) ou de la quantité de bâtiments endommagés (T2.2) pour un secteur donné.

Pour la tâche T2.1, la technique **IDWI** a obtenu en moyenne les moins bons résultats (54%). Cet écart de résultats a été particulièrement significatif avec la technique **SRP$_c$** (p = 0.0356) et plus globalement pour les techniques de type **SPR** (p = 0.0313). Viennent ensuite respectivement les techniques **C$_h$** (71%), **SPR$_h$** (75%), P (78%), C$_c$ (79%) et pour finir, **SRP$_c$** (83%). L'analyse statistique a montré l'absence de différence notable entre les techniques basées sur une couche (**P** et **SRP**) ou sur deux couches (**C** et **IDWI**).

Il n''est pas non plus apparu de différences significatives entre les techniques qui utilisaient un pavage (**C** et **SRP**) et les autres (**P** et **IDWI**). Par ailleurs et contrairement à ce qui a été observé avec les tâches T1, la réalisation de cette tâche s'est montrée plus performante pour les techniques qui utilisaient un pavage carré ($\mathbf{SRP}_c$ et $\mathbf{C}_c$) que celles utilisant une forme hexagonale ($\mathbf{SRP}_h$ et $\mathbf{C}_h$). Malgré ce constat, la différence des résultats entre les deux types de formes n'a pas paru significative ($p = 0.33355$).

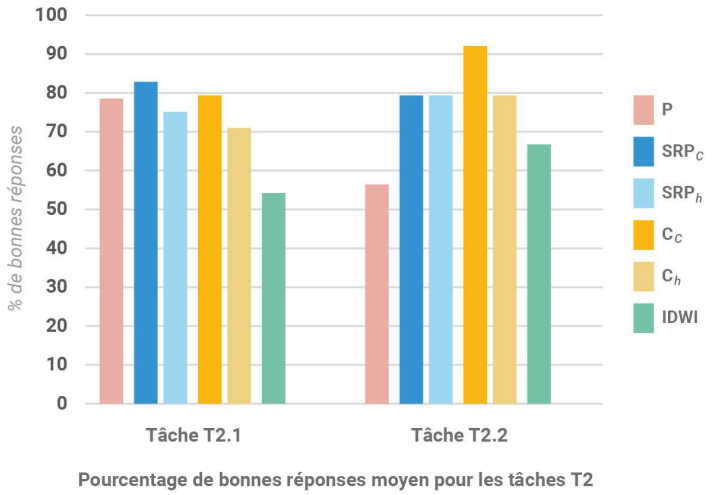


Figure 126 : Pourcentage de bonnes réponses moyen pour les tâches T2 (expérimentation #3)

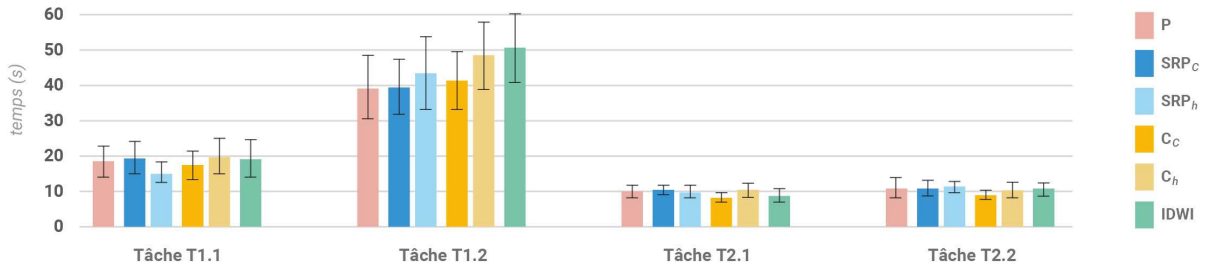
En ce qui concerne la tâche T2.2, la technique des points (**P**) a montré en moyenne les moins bons résultats (56%), suivie de l'interpolation **IDW** (66%). Pour cette tâche, des différences significatives ($p = 0.00839$) existent entre les techniques fondées sur un carroyage (**SRP** et $\mathbf{C}_h$) et les autres (**P** et **IDWI**). Ainsi, les techniques de semi-régulier de points proportionnels (**SRP**) et le carroyage hexagonal ($\mathbf{C}_h$) se sont montrés plus efficaces avec en moyenne 79% de bonnes réponses. Toutefois les meilleurs résultats sont apportés par le carroyage carré ($\mathbf{C}_c$) avec une moyenne de 92% de bonnes réponses. La différence entre les techniques de carroyage et de semi-régulier n'a cependant pas été significative ($p = 0.23413$). De la même manière que pour T2.1, les différences ne sont pas apparues significatives ni pour les deux types de formes (hexagonale ou carré) ni pour le nombre de couches (1 ou 2 couches).

Pour conclure, il apparait que les techniques basées sur des carroyages (**C** et **SRP**) ne se sont pas montrées plus efficaces que les points lors de l'estimation du niveau d'endommagement (T2.1). Elles l'ont été néanmoins pour les tâches de quantification (T2.2). De plus, les techniques de semi-régulier de points (**SRP**) ont été meilleures pour T2.1 que pour T2.2. Notons également que la forme carrée a donné toujours des résultats supérieurs ou égaux aux hexagones.

Analyse visuelle : Temps de réponse imparti à la réalisation des tâches

- **<u>Compilation des temps moyens de réponse par technique et par tâche :</u>**

L'Eye-tracker a permis de récupérer les temps d'exécution de chacune des tâches (T1 et T2) effectuées par chaque participant. Ces informations sont compilées en Figure 127. Cette dernière présente les temps moyens de réalisation des tâches par technique en affichant également les intervalles de confiance. À noter que les temps anormalement élevés, liés principalement à des questions de compréhension sur les tâches, ont été supprimés. Ainsi, pour les tâches T1, deux essais des techniques SRP et trois des techniques de carroyage ont été écartés. Pour les tâches T2, un essai de la technique des points a été supprimé.



a) Temps moyens pour les tâches T1 et T2 : les barres d'erreurs représentent les 95% d'intervalle de confiance

Figure 127 : Compilation des temps moyens par technique et par tâche (expérimentation #3)

Pour les tâches T1, la recherche des secteurs à forts dommages et en grand nombre (T1.1) a pris globalement moins de temps que l'identification des secteurs à forts dommages en moins grand nombre (T1.2). Pour la première, les tâches réalisées à partir du semi-régulier de points hexagonaux (**SRP$_h$**) et, dans une moindre mesure, du carroyage carré (**C$_c$**) ont été légèrement plus rapides que les autres techniques. Elles ont été réalisées en moyenne en 15.2s pour la première et en 17.17s pour la seconde. Les différences observées ne sont pas apparues significatives ($p \geq 0.1$ dans tous les cas de figure). Elles ne l'ont pas été non plus pour le nombre de couches (1 ou 2 couches), le fait d'utiliser un carroyage ou non (**SRP** et **C** *vs*. **P** et **IDW**), ou encore la forme de ce dernier (maille hexagonale ou carrée).

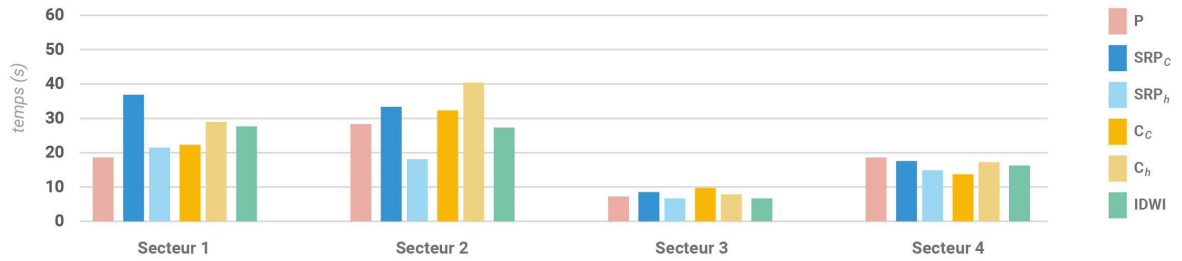
La tâche T1.2 a été réalisée plus rapidement pour les techniques de point (**P**) et de semi-régulier de points carrés (**SRP$_c$**), et ce sur des temps relativement proches (moyennes : 39.33s et 39.5s). Elle a été exécutée en moyenne en 41.42s et 43.29s pour le carroyage carré (**C$_c$**) et le semi-régulier de points hexagonaux (**SRP$_h$**). Ce sont finalement les techniques de carroyage hexagonal (**C$_h$**) et d'interpolation IDW (**IDWI**) qui ont été les plus longues à être analysées avec une moyenne de 48.41s et 50.54s. Ainsi, les techniques se fondant sur un carroyage carré (**SPR$_c$** et **C$_c$**) ont permis de réaliser plus rapidement les tâches que celles qui utilisent le carroyage hexagonal (**SRP$_h$** et **C$_h$**). De la même manière, les techniques qui utilisent une couche (**P** et **SRP**) ont fourni une réponse plus rapide que celles qui utilisent deux couches (**C** et **IDWI**). Malgré ce constat, les différences n'ont pas été significatives dans aucun des cas ($p \geq 0.08$).

Globalement, les tâches T2 ont pris autant de temps à être réalisées. Dans les détails, les participants ont été plus rapides pour les techniques qui utilisaient le carroyage carré (**C_c**) et, dans une moindre mesure, l'interpolation IDW (**IDWI**) pour réaliser la tâche T2.1. Les temps moyens de ces dernières ont oscillé entre 8.25s et 8.96s contre 9.7s et 10.67s pour les autres techniques. L'analyse statistique a révélé que le carroyage carré (**C_c**) était significativement plus rapide que les points ($p = 0.040$), **le semi-régulier de points carrés** ($p = 0.049$) et **le carroyage hexagonal** ($p = 0.035$). Aucune différence n'a été révélée concernant le nombre de couches ou la forme du carroyage de base. Pour la tâche T2.2, la technique de carroyage a offert de nouveau les meilleurs temps de réalisation (moyenne : 9s). Les temps d'exécution des autres techniques ont varié entre 10.25s et 11.12s en moyenne. Cet écart entre le carroyage carré et les autres techniques n'a pourtant pas été significatif ($p \geq 0.07$). Comme précédemment, le fait que le carroyage utilise une forme particulière ou que la technique utilise une ou deux couches n'a pas eu d'incidence sur le temps de réponse.

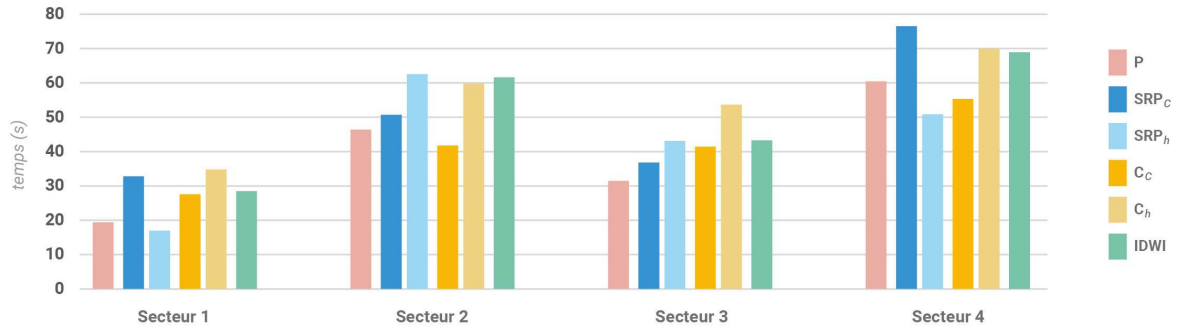
En conclusion, les techniques de carroyage carré (**C_c**) ont été plus rapides lors de l'exécution des tâches T1 et T2. Par ailleurs, la différence notable entre les temps d'exécution de T1 et T2 s'explique directement par le type de tâche à accomplir. La première nécessitait des opérations de recherche sur l'ensemble de la carte. Dès lors, il est intéressant de voir la différence entre T1.1 et T1.2. Il apparait que, quelle que soit la technique, la recherche des dommages les plus élevés en grand nombre a été plus rapide que celle des dommages élevés en plus faible quantité. Conformément aux résultats précédents se pose la question de l'influence de la dispersion des données sur les temps de réponse que nous approfondissons plus bas.

- **<u>Compilation des temps moyens de réponse pour T1 et par technique : secteurs géographiques</u>**

La Figure 128 compile les temps moyens de réponse par technique et par secteur géographique lors de l'exécution des tâches T1.1 et T1.2. Pour T1.1, les secteurs 3 et 4 ont été analysés plus rapidement avec des temps plus homogènes (7.75s en moyenne pour S3 et 16.30s pour S4). Viennent ensuite le secteur 1 (26s en moyenne) et le secteur 2 (29s en moyenne) avec des temps plus hétérogènes. Ainsi, les temps de réponse à cette tâche n'ont pas été influencés par la dispersion de la donnée des secteurs 2 et 4. Concernant les techniques, les temps de réponse ont été plus courts lorsque les étudiants étaient confrontés aux semi-réguliers de points hexagonaux (**SRP_h**), notamment au regard des secteurs 1 et 2. Toutefois, les temps de réponse se sont avérés plus longs pour les semi-réguliers de points carrés (**SRP_c**), à l'instar des techniques par qui ont affiché des temps d'analyse plus longs pour le secteur 2 (36s en moyenne). Les points (**P**) ont été analysés plus rapidement pour les secteurs 1 (18.5s) et 2 (27s) tandis que les temps de réponse pour l'interpolation **(IDW)** se montrés ni les plus longs ni les plus rapides observés.



a) Temps moyens pour la tâche T1.1



b) Temps moyens pour les tâches T1.2

Figure 128 : Compilation des temps moyens pour les tâches T1.1 (a) et T1.2 (b) en fonction des techniques et des différents secteurs géographiques (expérimentation #3)

À l'exécution de la tâche T1.2, le secteur 1 a été le plus rapide à analyser. S'en suivent progressivement les secteurs 3, 2 et 4. Pour chacun de ces secteurs, les temps de réponse sont assez variables entre les techniques. Néanmoins, les participants ont été plus longs à fournir une réponse pour les secteurs où la donnée est plus dispersée. Des temps respectifs estimés en moyenne à 54s et 64s pour les secteurs 2 et 4 contre 26s et 42s pour les secteurs 1 et 3. Pour le secteur 1 et 4, le semi-régulier de points hexagonaux est apparu plus rapide (moyenne : 16.6s et 50s). Cette technique a néanmoins été plus longue pour l'analyse du secteur 2 (62s en moyenne). Les points ont été plus rapidement analysés pour les secteurs 1 et 3 (moyenne : 19s et 31s en moyenne). Les techniques de carroyage hexagonal (**C$_h$**), ont pris le plus de temps à être analysées pour les secteurs 1 et 3 (moyennes : 34.6s et 54s).

Pour conclure, la distribution des données a exercé une influence plus ou moins marquée sur les temps de réponse. Pour la tâche T1.1, les secteurs 3 et 4 ont demandé moins de temps à être analysés. En les comparant avec les taux d'exactitude par secteurs géographiques, il apparait que le secteur 3 a facilité à la fois la rapidité d'exécution de la tâche et les niveaux de bonne réponse, et ce indépendamment des techniques utilisées. À l'inverse, le secteur 4 a engendré moins de bonnes réponses pour 3/6 des techniques sans doute, car il a été visionné moins longtemps que les secteurs 1 et 2. Concernant le secteur 1, la réalisation des tâches a pris plus de temps pour l'ensemble des techniques. Pourtant, les niveaux de réponses ont paru meilleurs et plus homogènes que le secteur 4, selon une logique que l'on retrouve aussi pour la tâche T1.2. Le secteur 1 prend moins de temps à être analysé, mais les taux de bonnes réponses sont moins bons. A contrario, le secteur 4 met plus de temps à être analysé, mais les niveaux de réponses sont les meilleurs de l'échantillon cartographique.

Le semi-régulier de points hexagonaux (SRP_h) est à la fois la technique qui prend le moins de temps pour la tâche T1.1 et qui fournit de bons résultats pour l'ensemble des secteurs géographiques, et ce qu'elle que soit la distribution de la donnée. Inversement, pour T1.2, les participants ont été plus longs pour de moins bons résultats comparés à T1.1. Ainsi, la confrontation de ces résultats (exactitude et temporalité) et la comparaison entre les secteurs d'études soulèvent des questionnements sur la saillance des techniques expérimentées. Dès lors, la capture du mouvement des yeux a permis d'approfondir ces observations.

10.2.2. Résultats de la phase d'analyse visuelle des participants : Analyse oculométrique

Analyse des processus de lecture des cartes par l'interprétation des îlots de chaleur

En plus du temps de réponse, l'Eye-tracker a fourni une donnée précieuse pour mieux comprendre les processus de lecture d'une carte. Les données oculométriques ont été exploitées afin d'estimer les zones de forte concentration du regard des participants. Les résultats ont été traités à partir de la tâche de localisation des secteurs les plus touchés (en nombre et en niveau de dommage). Ils sont représentés par les figures Figure 129 à Figure 132. Les îlots de chaleurs, fondés sur le temps de fixation et le taux de passage, présentent le cumul des données oculométriques de l'ensemble des participants lors de la réalisation de T1.1 (estimation des zones les plus touchées en intensité et en nombre) pour l'ensemble des secteurs géographiques et des techniques. Chacune des figures (Figure 129 à Figure 132, a) affiche la localisation des bonnes réponses (cercle noir en pointillé). Le principal intérêt de cette démarche a été de mettre en évidence les zones de forte fixation en dehors des réponses attendues (point noir avec un point d'exclamation blanc).

Pour le secteur 1- Palu (Indonésie), cinq zones étaient attendues pour la tâche T1.1 (Figure 129). Les taux moyens de bonnes réponses supérieurs ou égaux à 68% impliquent qu'au moins trois des cinq toponymes ont été cités par l'ensemble des participants et pour toutes les techniques. Parmi ces dernières, les techniques de point (**P**) et d'interpolation IDW (**IDWI**) ont obtenu les meilleurs résultats. Ils sont suivis des techniques de semi-régulier de points (**SRP**) puis de carroyage (**C**). Les données de l'Eye-tracker ont démontré qu'une seule zone indiquant une bonne réponse concentrée fortement l'attention des participants, et ceci pour l'ensemble des techniques. De la même manière, il semble qu'un secteur en particulier, au Nord-Est, ait attiré l'attention des étudiants, et ce quel que soit la technique. Toutefois, il ne correspond pas aux réponses attendues. De plus, les techniques d'interpolation (**IDWI**) et de carroyage (**C**) ont été les seules à provoquer deux zones d'attention visuelle non conformes aux réponses attendues. Néanmoins, trois des cinq localités attendues pour ce secteur ont fait l'objet d'une attention plus forte pour le carroyage hexagonal ($\mathbf{C}_h$). Pour ce cas précis, les différences oculométriques ne sont pas flagrantes, à l'instar des résultats statistiques.

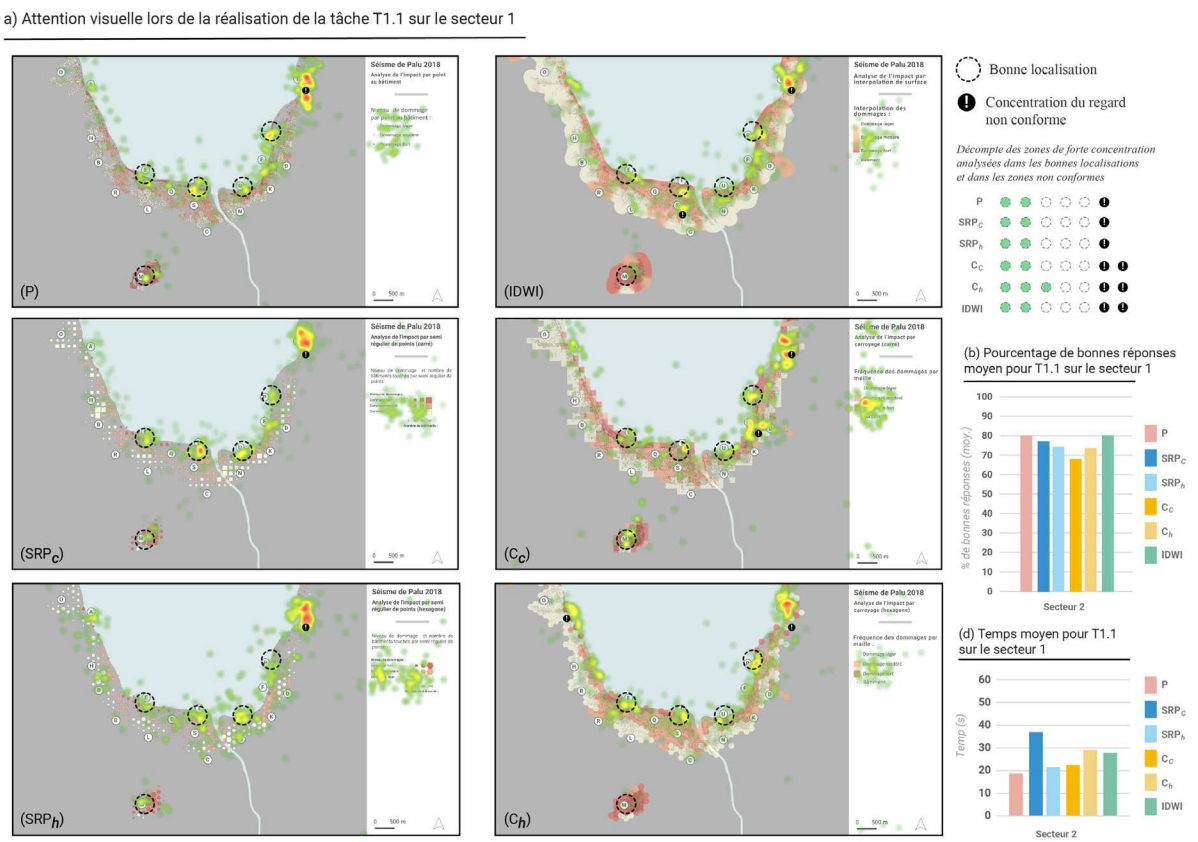


Figure 129 : Attention visuelle pour les 6 techniques étudiées lors de l'exécution de T1.1 pour le secteur 1 (a) et confrontation aux taux de bonnes réponses (b) et temps de réponse (d) (expérimentation #3)

Ces différences oculométriques ont été beaucoup plus significatives pour le secteur 2 – Saint-Joseph (Dominique) (Figure 130). Ce dernier se caractérisait par une dispersion plus importante des données et de meilleurs résultats obtenus par les semis réguliers de points (**SRP**), notamment celui qui utilisait les hexagones (**SRP$_h$**). Cette technique a d'ailleurs été à la fois la plus efficace (91%) et la plus rapide (18s) en moyenne. Les techniques de point et de carroyage hexagonal viennent ensuite (46%). Elles sont suivies de l'interpolation **IDW** (37.5%) et pour finir par le **carroyage carré** (29%). Dès lors, l'analyse oculométrique améliore la compréhension de l'hétérogénéité de ces résultats. Elle démontre que les techniques **SRP** ont été efficaces pour concentrer l'attention visuelle des participants sur les toponymes attendus (2 à 3 des 4 bonnes localisations), mais surtout pour réduire le nombre de zones de concentration du regard non conformes. L'analyse a également montré que les techniques **SRP** ont généré 4 zones d'attention non conformes aux réponses attendues contre 9 pour **P, C$_c$** à 10 pour **IDWI** et **C$_h$**.

Malgré une bonne concentration du regard vers les zones attendues, les techniques de point (**P**), de carroyage (**C**) et d'interpolation ont généré un balayage des yeux plus important lors de la recherche des informations pour la tâche T1.1. Pour le secteur 2 en particulier, il semblerait que la perception sensorielle des participants ait été plus facilement perturbée par la dispersion des données que pour le secteur précédent. Pour ces deux techniques, cela a donc impliqué une plus grande difficulté à analyser la carte dans son ensemble afin de déterminer facilement les secteurs les plus touchés.

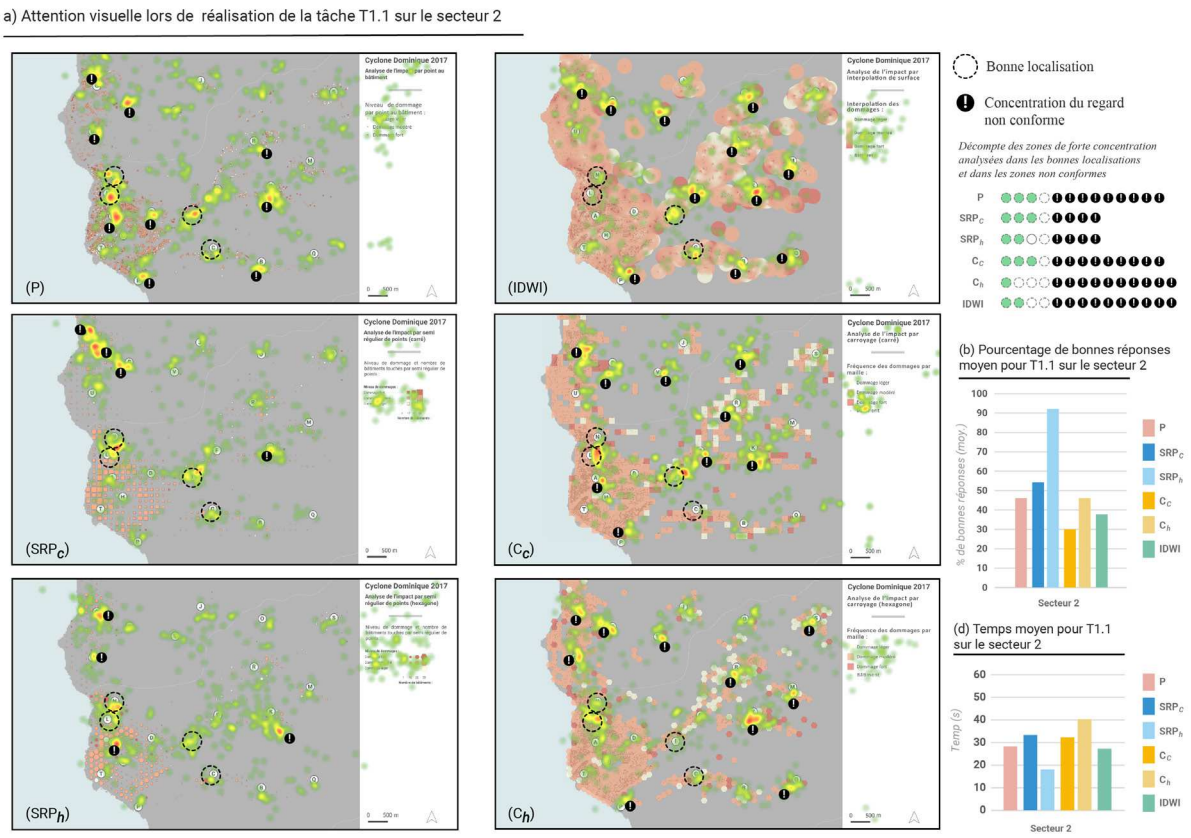


Figure 130 : Attention visuelle pour les 6 techniques étudiées lors de l'exécution de T1.1 pour le secteur 2 (a) et confrontation aux taux de bonnes réponses (b) et temps de réponse (d) (expérimentation #3)

Le secteur 3 – Marigot, Baie Nettlé (Saint-Martin) avait la particularité de juxtaposer les deux zones de dommages attendues (Figure 131). Cette disposition a eu pour principal effet de faciliter l'analyse visuelle comme en témoignent les taux de bonnes réponses obtenus pour chacune des techniques (Figure 131, b). De plus, la faible dilatation spatiale des zones à rechercher a conduit à des temps de réponse plus courts que sur les autres secteurs.

L'analyse des données oculométriques a également démontré une grande attention visuelle portée sur les deux secteurs en question, qu'importe le type de technique. Hormis la technique des points (**P**), l'ensemble des techniques a retenu l'attention visuelle des participants sur ces deux secteurs. Toutefois, l'analyse oculométrique a révélé que le semi-régulier de points hexagonaux (**SRP$_h$**) enregistrait une meilleure concentration visuelle sur les zones attendues pour la tâche T1.1. Elle n'a généré qu'une seule zone de concentration visuelle en dehors des toponymes attendus contrairement aux autres techniques où au moins trois de ces zones sont comptabilisées. Le semis régulier de points carrés (**SRP$_c$**), le carroyage carré (**C$_c$**), les points (**P**) et l'interpolation (**IDWI**), ont généré le plus grand nombre de fixations sur des zones non attendues. Par ailleurs, une de ces zones en particulier, située à l'Est de la carte, a été identifiée de manière récurrente pour l'ensemble des techniques. Pour ce secteur, les techniques qui utilisaient une forme hexagonale ont ainsi fourni une meilleure saillance visuelle.

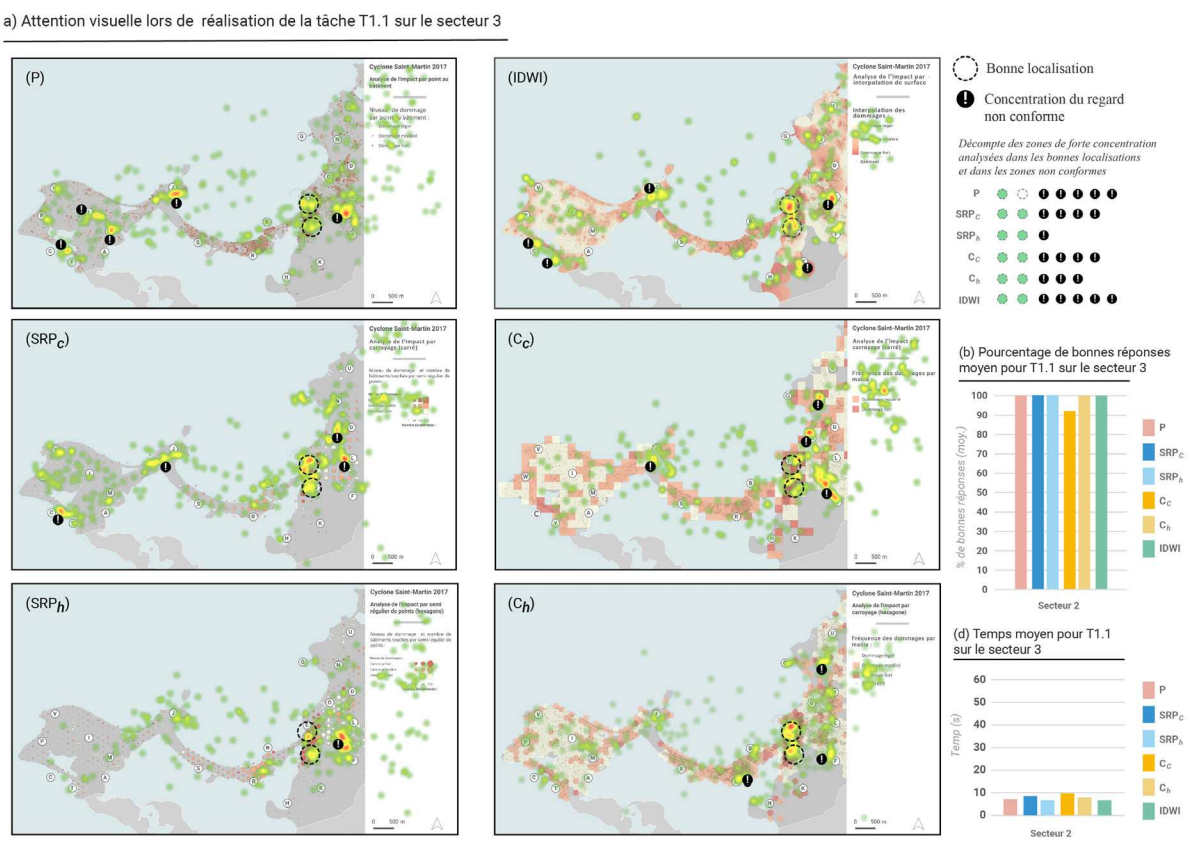


Figure 131 : Attention visuelle pour les 6 techniques étudiées lors de l'exécution de T1.1 pour le secteur 3 (a) et confrontation aux taux de bonnes réponses (b) et temps de réponse (d) (expérimentation #3)

À l'instar du secteur 2, le secteur 4 – Port-au-Prince-Carrefour (Haïti) présentait également une dispersion plus importante des dommages (Figure 132). Toutefois, les données oculométriques ont attesté d'un nombre plus réduit de zones de forte concentration non conformes aux quatre localisations attendues pour la réalisation de T1.1. Ce constat semble correspondre au temps de réponse pour chacune des techniques (Figure 132,b). Seule l'interpolation (**IDWI**) a provoqué une concentration du regard des participants sur cinq zones hors sujettes contre une seule pour l'ensemble des autres techniques. Ces observations concordent avec le taux de bonnes réponses fournies par **IDWI** et qui, avec la technique des points (**P**) ont été les plus bas pour ce secteur (34,5% en moyenne). Un autre constat a retenu notre attention. Il concerne les techniques de semi-régulier de points (**SRP**) et de carroyage hexagonal (**C$_h$**). Malgré des taux importants de bonnes réponses (≥70% en moyenne), ces derniers ont donné lieu à une concentration visuelle hétérogène. **SRP$_c$**, notamment, s'est démarqué par la faible concentration du regard dans les quatre zones attendues. Ce constat témoigne du plus grand intérêt à analyser les zones de concentration du regard qui sont non conformes aux réponses attendues pour cette tâche. Par ailleurs, le fait qu'une de ces zones soit redondante entre les techniques de points (**P**), du semi-régulier de points (**SPR**) et de l'interpolation (**IDWI**) semble suggérer une stratégie de lecture commune pour ces cartes.

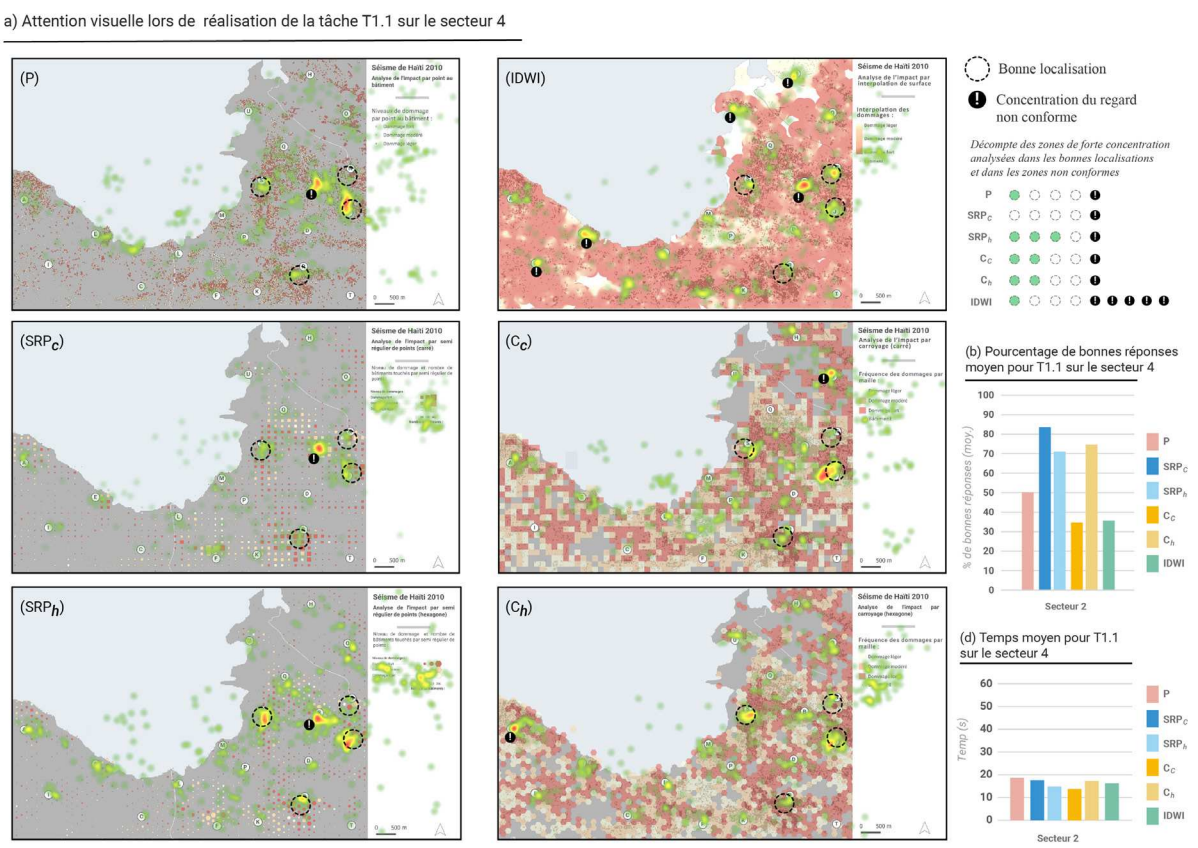


Figure 132 : Attention visuelle pour les 6 techniques étudiées lors de l'exécution de T1.1 pour le secteur 4 (a) et confrontation aux taux de bonnes réponses (b) et temps de réponse (d) (expérimentation #3)

De manière générale, l'ensemble des résultats oculométriques a démontré que la dispersion des données ne semblait pas être le seul facteur contraignant lors de la recherche visuelle des secteurs les plus touchés (T1.1). Toutefois, nous supposons que cette dispersion a entraîné une diminution du taux de bonnes réponses fournies pour les techniques des points (**P**) et d'interpolation (**IDWI**). Cette dernière a été particulièrement affectée par la répartition spatiale des dommages. Même lorsque la donnée était concentrée, l'Eye-tracker a enregistré des zones de concentration de l'attention visuelle éloignée des objectifs de la tâche. Ces dernières ont été potentiellement provoquées par la méthode de calcul (rayon de 200 mètres) qui crée des surfaces rouges plus importantes à la lisière des surfaces interpolées, notamment lorsque ces dernières sont isolées ou plus dispersées. Parmi les techniques expérimentées, le semi-régulier de points hexagonaux (**SRP$_h$**) a offert un bon compromis, à la fois entre les résultats statistiques et la saillance visuelle, mais également vis-à-vis de la dispersion des dommages.

10.2.3. Évaluation des critères d'efficacité et d'esthétisme des types de représentation cartographique des dommages

Analyse des préférences utilisateurs

À la fin de chaque session, l'ensemble des 6 techniques ont été présentées aux participants sur un même secteur géographique (issu du DS_2). Il leur a été demandé de noter les techniques selon trois critères. Le premier concernait le sentiment d'efficacité vis-à-vis de l'exécution des tâches, le second leur niveau d'esthétisme et le troisième le rapport perçu entre efficacité et esthétisme. Les notes ont été classées de 1 "très mauvaises" à 5 "très bonnes". Ces résultats sont synthétisés ci-dessous (Figure 133).

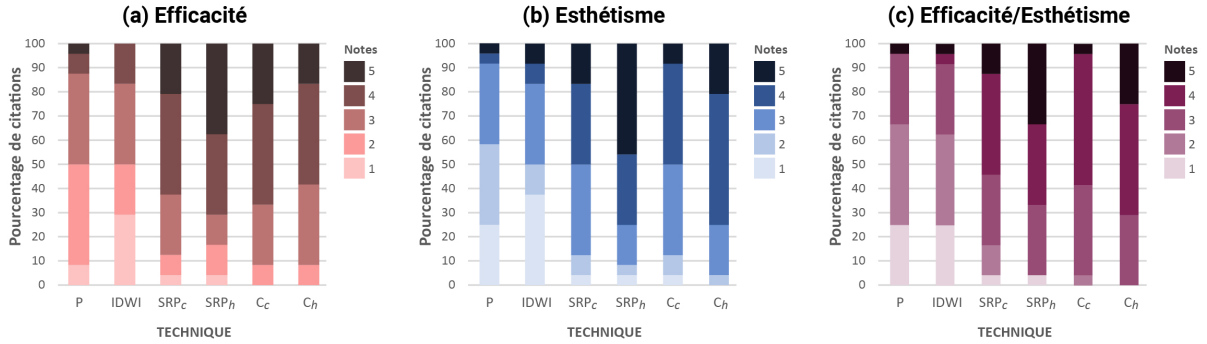


Figure 133 : Notes de 1 (très mauvaise) à 5 (très bonne) attribuées par les utilisateurs en matière d'efficacité (a), d'esthétisme (b) et du rapport de ces deux critères (c) pour chaque technique (expérimentation #3)

Au regard des résultats, les techniques **SRP_h**, **C_h** puis **SRP_c** et **C_c** ont été jugées comme étant les plus efficaces (Figure 133, a). Elles ont obtenu respectivement 70%, 67%, 63% et 58% des notes supérieures ou égales à 4/5. Ces résultats sont assez proches des notes recensées pour la perception de l'esthétisme (Figure 133,b). **SRP_h** et **C_h** ont tous deux présenté des notes supérieures ou égales à 4/5 pour 75% des cas avec une moyenne respective de 4.1/5 et 3.9/5. **SRP_c** et **C_c** ont montré des résultats sensiblement inférieurs avec des notes supérieures ou égales à 4/5 pour 50% des cas (moyenne de 3.5/5 pour **SRP_c** et de 3.42/5 pour **C_c**). Nous constatons que les techniques **IDWI** et **P** ont tous deux obtenu les moins bonnes notes sur ces deux critères (figure 11a et b). En moyenne, **IDWI** et **P** ont affiché respectivement une note de 2.38/5 et 2.44/5.

Ainsi, qu'il s'agisse d'efficacité ou d'esthétisme, les participants ont privilégié les techniques de carroyage (**C**) et de semi-régulier de points (**SRP**), délaissant les points (**P**) et l'interpolation (**IDWI**). Cela est confirmé par le troisième critère concernant le rapport entre l'efficacité et l'esthétisme (figure 11c). Les techniques **SRP_h** et **C_h** ont totalisé les meilleurs résultats avec une note moyenne de 3.96/5 (*c.-à-d.* environ 70% des participants ont attribué des notes supérieures ou égales à 4). C_c est arrivé en troisième position avec une note moyenne de 3.58/5. Plus de 50% des participants lui ont accordé une note supérieure ou égale à 4/5. **SRP_c** a obtenu une note moyenne de 3.46/5. **IDWI** et **P** ont été, quant à elles, les techniques les moins bien notées avec respectivement des notes moyennes de 2.25/5 et 2.17/5. Plus de 63% des participants ont attribué des notes inférieures à 2/5.

Corrélation entre les résultats et la perception de l'efficacité des participants

Comme pour l'expérimentation #2, nous avons tenté de déterminer l'existence d'une corrélation entre la perception de l'efficacité par les participants et leurs résultats aux tâches de localisation et d'estimation. Dans ce cas précis, nous avons comparé la valeur moyenne des pourcentages de bonnes réponses des techniques, toutes tâches confondues (Figure 133, a), à la perception de l'efficacité des participants (Figure 133, a). Les résultats obtenus ont démontré l'existence d'une bonne corrélation entre ces deux variables. Par exemple, le semi-régulier de points hexagonaux (**SRP$_h$**) a obtenu à la fois les meilleurs résultats aux tâches et la meilleure note concernant l'efficacité perçue. Toutefois, lorsqu'il s'agissait de la forme carrée (**SRP$_c$**), cette efficacité semble avoir été moins bien perçue vis-à-vis des résultats obtenus par cette technique. La perception de l'efficacité pour le carroyage hexagonal (**C$_h$**) est également bien corrélée au pourcentage moyen de bonnes réponses. Les techniques de point (**P**) et d'interpolation (**IDWI**), ayant donné de moins bons résultats, ont été considérées en moyenne comme les moins efficaces. Néanmoins, la technique des points (**P**) semble sous-évaluer par rapport à l'interpolation (**IDWI**), notamment au regard de la moyenne des bonnes réponses.

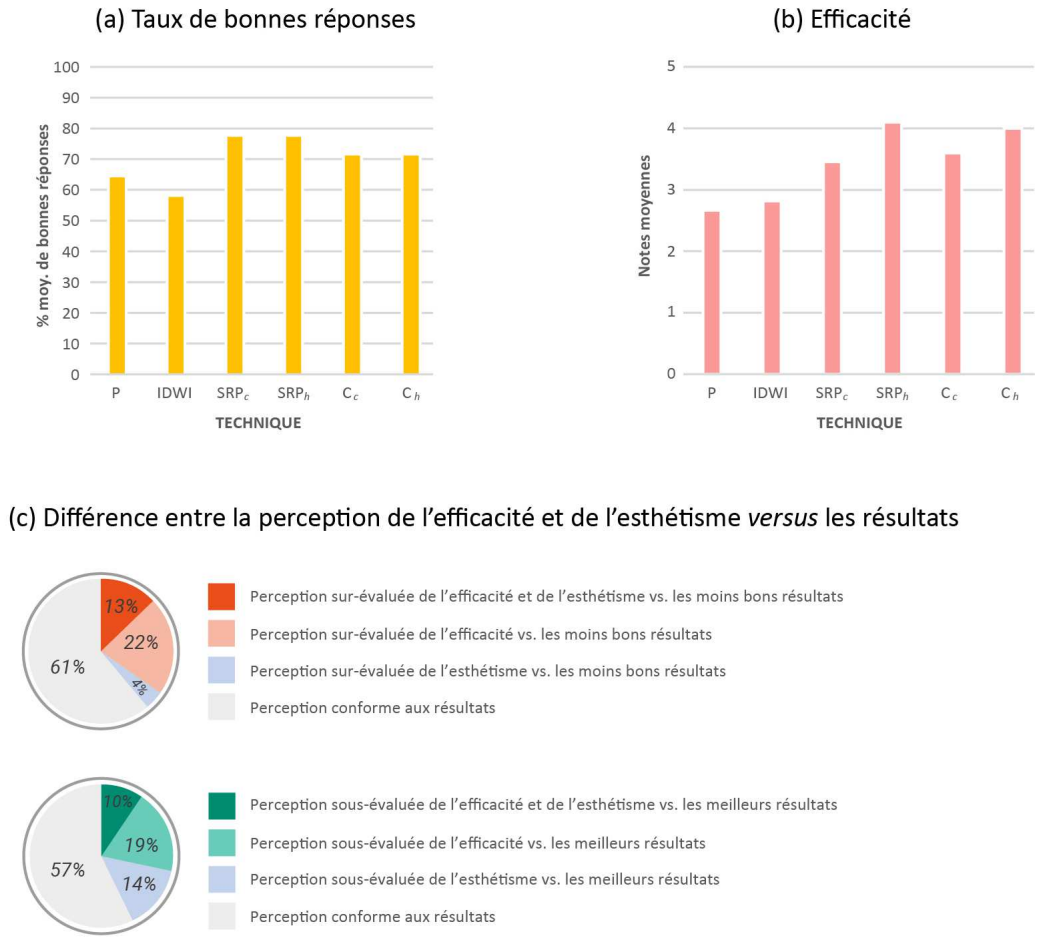


Figure 134 : Comparaison des pourcentages moyens de bonnes réponses pour l'ensemble des tâches (a) à l'efficacité perçue des participants (b), par techniques ; Et différence entre la perception de l'efficacité et de l'esthétisme versus les moins bons et les meilleurs résultats obtenus pour l'ensemble des tâches et par techniques (c) (expérimentation #3)

Nous avons également repéré, pour chaque participant, la technique avec laquelle il a été le moins efficace et le plus efficace en considérant le niveau de bonnes réponses à l'ensemble des tâches. Cette information a été comparée à leur perception de l'efficacité et de l'esthétisme pour la technique en question. Ce croisement a démontré qu'environ 35% des participants ont surévalué l'efficacité qu'ils percevaient des techniques en comparaison des résultats obtenus (Figure 133, c). Parmi eux, 13% ont également surévalué l'efficacité et l'esthétisme. 22% ont surévalué l'efficacité, mais ont attribué une note à l'esthétisme conforme à leurs résultats. Seuls 4% des participants ont uniquement surévalué l'esthétisme. Lorsque l'analyse est effectuée sur les meilleurs résultats, elle a démontré qu'environ 30% des participants ont cette fois-ci sous-évalué les techniques pour lesquelles ils avaient obtenu de bons résultats. Parmi ces 30%, 10% ont également sous-évalué l'esthétisme. Pour 19% des cas, les techniques ont été plus esthétiques qu'efficaces. A *contrario*, 14% des participants ont sous-évalué l'esthétisme de ces techniques vis-à-vis de leur efficacité.

De manière générale, il semblerait qu'il y ait une corrélation entre les critères d'esthétisme et d'efficacité pour environ 70% des cas. Lorsque l'efficacité est conforme ou surévaluée, l'esthétisme suit une tendance similaire. Dans ces cas précis, nous constatons que 60% des participants ont fourni une appréciation conforme au niveau d'exactitude de leurs réponses. Ainsi ces résultats ont confirmé que pour plus de la moitié des participants, l'efficacité, et donc l'esthétisme qui lui est corrélé, sont bien influencés par la capacité d'analyse et d'interprétation de la carte. Une technique moins esthétique, donc moins efficace, pour le lecteur peut être liée à une plus grande difficulté à répondre aux tâches, et inversement. Cette comparaison a permis *in fine* de corroborer la relation entre l'efficacité et le taux de bonnes réponses (Figure 133).

10.3. Synthèse de l'expérimentation #3

Cette troisième expérimentation a confirmé certaines observations qui ont pu être mises en avant lors des précédentes expérimentations. C'est notamment le cas de l'hypothèse de départ (H1) qui supposait que les représentations cartographiques qui regroupent la donnée (carroyage, interpolation, semi-régulier de points) seraient plus efficaces visuellement que les points et donc faciliteraient la lecture du message cartographique. Les résultats de l'expérimentation #3 valident partiellement cette hypothèse (H1). En effet, elle ne concerne qu'une partie des techniques d'agrégation statistique. Parmi ces dernières, les techniques de semi-régulier de points proportionnels (**SRP**) et de carroyage (**C**), et plus particulièrement celles qui utilisaient la forme hexagonale, ont obtenu en moyenne les meilleurs résultats pour l'ensemble tâches T1 et T2. Cependant, les cartes qui utilisaient la technique des points (**P**) se sont montrées en moyenne plus efficaces que la technique d'interpolation (**IDWI**). De manière analogue, les données du suivi oculométrique pour la tâche T1.1 ont validé que les techniques **SRP** fournissaient une meilleure attention visuelle sur les secteurs à identifier et provoquaient moins de fixations hors sujet que les points (**P**). Cela n'a toutefois pas été le cas pour les méthodes d'interpolation (**IDWI**) et dans une moindre mesure le carroyage (**C**). L'interpolation a d'ailleurs été particulièrement sujette à des taux de fixations non conformes aux objectifs de recherche pour cette tâche.

Ces résultats valident en partie l'hypothèse 2 (H2) qui soutenait l'idée que les combinaisons significatives (taille et couleur /densité et couleur) devaient fournir de meilleurs résultats pour visualiser

des informations quantitatives et qualitatives vis-à-vis des techniques qui utilisent deux couches. Les résultats obtenus aux tâches de localisation (T1) et d'estimation (T2) ont démontré qu'elles étaient en moyenne meilleures que le reste des techniques pour les tâches T1.1 et T2.1. Elles ont demandé moins de temps à être analysées pour les tâches T1.1 et T1.2.

Le traitement séparé de ces résultats en fonction des secteurs géographiques a permis de valider l'hypothèse 3 (H3). Cette dernière considérait que l'implantation géographique des données pouvait jouer un rôle dans la perception du lecteur. Les techniques qui favorisaient une structuration de l'information seraient donc plus efficaces lorsque les données sont dispersées. De fait, les résultats ont témoigné d'une dépendance des taux de bonnes réponses en fonction des différents secteurs. La dispersion des données des secteurs S2 et S4 s'est accompagnée d'une baisse significative des taux de bonnes réponses de la tâche T1.1. De plus, l'interpolation (**IDWI**) est apparue comme particulièrement affectée par ces niveaux de dispersion.

Lors du développement du semi-régulier de points proportionnels, il a été mis en exergue l'apport théorique du maillage hexagonal vis-à-vis de la forme carrée, notamment sur l'amélioration de la perception et de la lisibilité des données carroyées. Cette expérimentation a été l'occasion de tester cette hypothèse (H4). Le traitement des réponses a révélé qu'en moyenne les mailles hexagonales (**C_h**) ont apporté de meilleurs résultats pour les tâches T1, mais pas pour les tâches T2. Ces mailles ont en particulier pris plus de temps pour être analysées. En outre, le suivi oculométrique de la tâche T1.1 a indiqué qu'il y a peu de différence perception entre les deux formes. Cette expérimentation ne permet donc pas de confirmer l'apport théorique de la forme hexagonale (H4). Cependant, elle est préférée à la forme carrée d'un point de vue esthétique. Cela nous amène à l'hypothèse (H5). Cette dernière supposait l'existence d'une corrélation entre les notes attribuées par les participants aux qualités d'esthétisme et d'efficacité de chacune des techniques et leurs résultats aux tâches expérimentées. Cette hypothèse (H5) est partiellement validée puisqu'il semble que la technique de point (**P**), qui malgré des résultats pour les T1.1, T2.1 et des temps d'analyse plus rapides que les carroyages, a été moins bien notée sur ces critères par les participants. Hormis ce cas précis, l'hypothèse est valide. L'interpolation (**IDWI**) ayant obtenu les moins bons résultats aux tâches T1 et T2 a été moins bien notée sur les critères d'efficacité et d'esthétisme. Le fait de comparer l'esthétisme et l'efficacité par rapport aux réponses obtenues permet de dégager une autre tendance. Les cartes plus esthétiques possèdent plus de chance d'être jugées comme efficaces par les participants, et seront probablement plus attractives. Cela s'est traduit pour plus de la moitié des participants par une bonne corrélation entre le ressenti de l'esthétisme et les résultats obtenus.

Pour conclure, cette expérimentation a mis en avant une meilleure efficacité des techniques basées sur des carroyages (**SPR** et **C**) que les autres techniques (**P** et **IDWI**) pour accomplir les tâches de type T1. Compte tenu de ces résultats, le semi-régulier de points proportionnels (**SRP**) se montre d'autant plus efficace qu'il semble moins souffrir des effets de dispersion de la donnée. En outre, les îlots de chaleurs extraits des données oculométriques témoignent d'une meilleure saillance visuelle de cette technique dans les zones attendues pour la réalisation de T1.1. Nous pouvons en déduire que les variables visuelles (taille et couleur) facilitent la lecture et la captation des données en dehors de la zone fovéale, quel que soit leur agencement dans l'espace, et cela même sans avoir de connaissances préalables sur les informations affichées.

Conclusion intermédiaire

L'expérimentation #1 a démontré la nécessité d'améliorer l'interprétation des utilisateurs face à la lecture de données quantitatives et qualitatives présentées différemment par les services de cartographies rapides. La diversité des représentations introduit des erreurs d'estimations de la donnée que nous avons cherché à gommer en développant un modèle cartographique sur la base des règles de sémiologie graphique. Cette section a montré comment l'agrégation spatiale des données par la méthode de carroyage peut être employée pour la création d'un modèle cartographique de visualisation des dommages. Malgré les résultats peu satisfaisants (en termes d'analyse visuelle et d'appréciation par les participants) de cette technique lors de la première expérimentation (expérimentation #1), cette méthode présente des avantages **comme la possibilité de jouer avec la résolution des mailles, le désenclavement des maillages administratifs ou des blocs urbains**. Elle offre également l'avantage facile d'accès et d'utilisation en étant commune à bon nombre de disciplines et d'applications cartographiques. Comme toute technique, elle présente également des limites. Elle ne tient pas compte des limites naturelles. Son affichage seul ne permet de montrer qu'un seul type d'information (qualitative ou quantitative). Elle nécessite une réduction statistique qui contraint à un lissage trop important de l'information en fonction des échelles de résolution.

En composant avec ses avantages et limites, une méthode de carroyage est proposée dans le développement d'un semi-régulier de points proportionnels. Réalisée sous SIG, cette technique permet de profiter des avantages de la maille et de l'implantation ponctuelle. Elle bénéficie ainsi du caractère significatif de ces combinaisons de techniques et de variables visuelles. Elle permet de jouer avec la significativité des variables de taille et de couleur pour illustrer sur une même implantation deux composantes différentes (quantité de bâtiments endommagés et niveaux d'endommagement). Elle permet également, grâce à l'application sur un carroyage régulier, de créer une combinaison redondante entre la proportionnalité des surfaces et la densité des points (localisation des densités de points de grandes tailles). Ces différents choix techniques et sémiologiques avaient pour objectif d'optimiser la sélectivité rétinienne et la lisibilité des dommages, notamment aux petites et moyennes échelles cartographiques. Les apports théoriques de cette proposition ont été testés en comparaison de représentations préexistantes dans la cartographie des dommages *post*-catastrophes à travers deux nouvelles expérimentations fondées sur l'analyse de leurs capacités cognitives (expérimentation #2) et sensorielles (expérimentation #3). Les résultats majeurs de ces deux expérimentations font l'objet de présentations et de discussions dans la partie suivante.

PARTIE 4 : DE L'EXPERIMENTATION AU DEVELOPPEMENT DE NOUVEAUX SUPPORTS CARTOGRAPHIQUES DYNAMIQUES

Marigot, Saint-Martin, Petites Antilles Française

Partie 4 : De l'expérimentation au développement de nouveaux supports cartographiques dynamiques

Cette ultime partie fait un état des lieux des principaux résultats des deux expérimentations menées afin de tester la validité des hypothèses émises sur les apports visuels et cognitifs de la représentation proposée. Nous revenons sur les protocoles expérimentaux de cette thèse en considérant les apports de ces derniers dans l'analyse des cartes et l'intérêt d'intégrer l'humain au cœur de la conception cartographique. Nous détaillons également les forces et faiblesses de ces derniers dans la perspective d'apporter notre retour d'expérience et d'améliorer les protocoles à venir.

La représentation proposée dans cette thèse fait l'objet d'une discussion et d'approfondissements, notamment autour du développement d'outil de géovisualisation et d'optimisation des processus d'aide à la décision *post*-catastrophe. Pour cela, nous profitons des aspects techniques du semi-régulier de points proportionnels permettant la mise en place d'un continuum sémiologique multi-échelle assurant l'emboitement statistique des données traitées. Les résultats de ce travail sont présentés au moyen de deux démonstrateurs de cartographie web développés (**1**) dans le cadre des recherches menées par le LAGAM et (**2**) au sein des prestations du bureau d'études RisCrises. Ces démonstrateurs mettent l'accent sur deux méthodes d'exploitation et finalités, l'une axée sur des aspects sensibilisation et le transfert de connaissance et l'autre sur les aspects plus opérationnels, de notre représentation.

Nous reviendrons également sur la notion d'incertitude appliquée au cas de la cartographie des dommages *post*-catastrophes, ses sources connues et expérimentées à travers les protocoles expérimentaux. Cette analyse des incertitudes est complétée par une proposition de représentation cartographique qui peut être intégrée lorsque le niveau de fiabilité d'une donnée est établi.

Chapitre 11 : Résultats majeurs et discussion autour des protocoles expérimentaux

11.1. Résultats majeurs des protocoles expérimentaux

11.1.1. La place du semi-régulier de points proportionnels face aux méthodes traditionnelles

Cette sous-section présente les résultats majeurs obtenus par la mise en œuvre des expérimentations #2 et #3 visant à tester la représentation cartographique proposée (**semi-régulier de points proportionnels**). Ces résultats sont synthétisés dans le Tableau 16 intégrant notamment les tâches de localisation et d'estimation (a), les spécificités des expérimentations (b) et les critères de perception des utilisateurs (c). Le tableau fait la moyenne des résultats obtenus lorsque les tâches sont identiques pour les deux expérimentations. Sinon, il présente le résultat obtenu par la technique en identifiant le numéro de l'expérimentation entre parenthèses. Les blocs urbains et les interpolations quantitatives (carte de densité) n'ont par exemple pas été testés lors de l'expérimentation #3. Les représentations par point et surface au bâti ont été regroupées afin d'illustrer les résultats obtenus pour ces deux méthodes.

Afin de faciliter la synthèse visuelle, les cases ont été colorisées en fonction des résultats obtenus. Le vert illustre les taux de bonnes réponses supérieurs à 50% ; l'orange, les taux de mauvaises réponses inférieures à 50% pour les tâches d'analyse visuelle (a). Ce code couleur donne une indication sur les meilleurs résultats obtenus aux tâches spécifiques (capacité de mémorisation et zones de concentration non conformes) (b) et a été reproduit pour différencier les notes supérieures ou égales à 3/5 concernant les critères de perception des utilisateurs (c). L'analyse d'ensemble de ces résultats permet de tester la validité des hypothèses de départs communes et distinctives des expérimentations #2 et #3. Elle apporte plus particulièrement une estimation de l'apport théorique du semi-régulier de points proportionnels, du point de vue cognitif et sensoriel, vis-à-vis de techniques couramment employées dans la cartographie rapide *post*-catastrophes.

Ainsi, dans un premier temps, il apparait que les techniques qui agrégeaient statistiquement la donnée (les blocs urbains, le carroyage, l'interpolation, la densité et le semi-régulier de points) ont obtenu de meilleurs résultats que les techniques des points ou des surfaces au bâti. Ce constat est particulièrement observable pour les tâches de localisation des secteurs les plus touchés, ceux les moins touchés ou pour la localisation d'entités en plus faible quantité (Tableau 16,a). Parmi ces techniques, certaines semblent avoir été plus efficaces que d'autres. Les techniques de densité, de semi-régulier de points et de blocs urbains par exemple ont obtenu de meilleurs résultats concernant les taux de convergence de la mémorisation. Toutefois, les contraintes de la dispersion des données, mise en exergue par l'expérimentation #3, donnent à réfléchir sur l'impact que cette dernière a pu avoir sur les résultats de l'expérimentation #2. Cette supposition interroge donc la mémorisation des secteurs les plus touchés, car les résultats ont pu être influencés par cette dispersion. Hormis le semi-régulier de points, nous constatons que les techniques d'interpolation et de carroyage ont engendré autant, voire plus, de concentration de l'attention sur des zones non conformes aux réponses attendues (Tableau 16,b). En outre, les différences observées pour les techniques de densité entre les expérimentations #2 et #3,

souligne que la technique du semi-régulier profite également d'une bonne capacité de mémorisation compte tenu de la forte dispersion des données de la carte #5 présentée durant l'expérimentation #2. Cette hypothèse, issue de ces analyses n'a pas pu être exploitée dans cette thèse et devra être validée par de nouvelles expérimentations.

Tableau 16 : Résultats généraux des expérimentations #2 et #3 reprenant les tâches à accomplir (a), les spécificités des expérimentations (b) et la perception utilisateur (c)

(a) Tâches à accomplir (%) :		Points/ Surface	Blocs urbains	Carroyage	Interpolation	Densité	Semi-régulier de points proportionnels
#2 et #3	Localiser les secteurs les plus touchés :	59,5	91 (#2)	71,5	77	92 (#2)	85,5
#3	Localiser les secteurs fortement touchés pour un faible nombre de bâti :	49	*ND*	66	53	*ND*	67,5
#2	Localiser les secteurs les moins touchés :	27	76	78	57	76	58
#2 et #3	Estimer le niveau de dommages :	59,5	12 (#2)	42	66	12 (#2)	84
#2 et #3	Estimer la quantité de dommages :	55,5	64 (#2)	76	45	65 (#2)	86
#2	Taux de réponses fausses ou hors-sujets (Estimation) :	52,5	61,5	61	54	61,5	7,5

(b) Spécificité de l'expérimentation (%) :		Points/ Surface	Blocs urbains	Carroyage	Interpolation	Densité	Semi-régulier de points proportionnels
#2	Convergence de mémorisation >50% :	0	45	0	0	99	51
#3	Zone de concentration non conforme :	16	*ND*	16	22	*ND*	8,5

(c) Perception utilisateur (-/5) :		Points/ Surface	Blocs urbains	Carroyage	Interpolation	Densité	Semi-régulier de points proportionnels
#2 et #3	Niveau d'efficacité :	2,56	3,9 (#2)	3,8	2,6	3,5 (#2)	3,8
#3	Niveau d'esthétisme :	2,16	*ND*	3,8	2,13	*ND*	3,7
#2	Niveau de certitude :	3	3,5	3,3	3,1	3,2	3,5

Finalement, le croisement de ces résultats valide partiellement l'hypothèse générale selon laquelle : les méthodes d'agrégation statistique optimisent les processus cognitifs et sensoriels de la lecture et de l'interprétation d'une carte. Les résultats valident cependant l'hypothèse de mécanismes communs à ces processus qui peuvent évoluer en fonction des participants et de leurs connaissances cartographiques. Ces mécanismes mettent en exergue des problématiques récurrentes à l'interprétation des représentations échantillonnées. Certaines représentations, notamment le bloc urbain, la densité et l'interpolation, ont été sujettes à de fortes confusions pour la tâche d'estimation qualitative et quantitative (Tableau 16,a). Ce constat était déjà observable pour les résultats de l'expérimentation #1, témoignant ainsi d'erreurs récurrentes d'interprétation et d'estimation imputables aux représentations cartographiques mono-informationnelles. Le regroupement typologique des résultats de l'expérimentation #2 montre d'ailleurs que ces mécanismes perceptuels et cognitifs ne sont pas complètement dépendants du niveau de pratique cartographique et du cœur de métier (en lien avec la gestion des risques) des participants.

De plus, ces résultats permettent de valider l'hypothèse de départ concernant le semi-régulier de points proportionnels. Même si cette technique n'a pas atteint complétement les objectifs escomptés, notamment pour les tâches de localisation des secteurs les moins touchés par exemple, le rôle significatif de la sémiologie graphique dans la lecture et l'interprétation des cartes n'en reste pas moins identifié. En effet, les expérimentations ont démontré que les représentations qui affichent les dommages par l'intermédiaire d'une combinaison significative de deux variables visuelles ont un fort potentiel d'interprétation, notamment au regard des techniques traditionnellement utilisées par les services de cartographies rapides. La représentation par semi-régulier de points proportionnels obtient de bons résultats aux tâches d'analyse visuelle des expérimentations #2 et #3 (Tableau 16,a). Il montre une plus grande facilité de mémorisation que les techniques de point, de carroyage et d'interpolation pour l'expérimentation #2 ; et présente également une bonne saillance graphique lors de l'extraction des données oculométriques de l'expérimentation #3 (Tableau 16,b).

Ainsi, le semi-régulier de points proportionnels répond aux besoins d'analyser la répartition spatiale de l'endommagement sans difficulté. Il favorise l'assistance visuelle, par les variables de forme, de taille et de couleur qui vont structurer l'espace et guider le parcours du lecteur. Cela a pour effet de renforcer les capacités de la mémoire, même des utilisateurs les plus profanes, et de réduire la concentration du regard en dehors des zones attendues pour la localisation des zones les plus touchées. Cette méthode réduit par ailleurs les erreurs d'interprétation liées aux estimations quantitatives et qualitatives des données (Tableau 16,a) observables pour les autres techniques. Cela est d'autant plus intéressant compte tenu du faible nombre de cartes présentant cette double information. **Ainsi et ceci de manière contre-intuitive, ce n'est pas l'augmentation de la quantité d'entités graphiques qui vient renforcer la communication cartographique et *in fine* son niveau d'interprétation, mais plus la simplification structurelle de l'information géographique. Ces observations confortent l'idée de synthétiser l'information afin d'accroitre « la synoptique de la construction cartographique ».**

Pour finir, nous avions aussi émis l'hypothèse que les cartes les plus efficaces (en termes de bonnes réponses) seraient mieux perçues (en termes d'efficacité et d'esthétisme) par les participants. Cette perception apparaitrait notamment dans la pondération de l'efficacité et l'esthétisme des techniques d'agrégation. En effet, les expérimentations #2 et #3 ont démontré que cette hypothèse pouvait être validée. Elle est aussi corroborée par l'expérimentation #1. Malgré les erreurs récurrentes d'estimation quantitative ou qualitative, il semble que les techniques ayant fourni en moyenne les meilleurs résultats soient considérées comme plus efficaces par les participants. Pour ces dernières les participants ont considéré être plus certains de leur analyse (Tableau 16,c). Les blocs urbains par exemple, ont globalement été bien notés sur ces critères. Pourtant cette technique était sujette à des biais d'interprétations qualitatifs. Le semi-régulier de points proportionnels, quant à lui, bénéficie d'une bonne perception de la part des participants. Les critères d'efficacité, d'esthétisme ont été particulièrement bien notés tout comme le niveau de certitude de leur analyse. Du point de vue perceptif, le semi-régulier de points proportionnels a été mieux perçu que les techniques de points/surface au bâti, d'interpolation et de densité. Le semi-régulier de points proportionnels a ainsi offert le meilleur compromis entre l'efficacité réelle (capacités cognitives, sensorielles) et l'efficacité perçue (capacités perceptives).

11.1.2. Le rôle des critères subjectifs dans l'efficacité d'une carte

Les précédents résultats amènent à s'interroger sur le rôle des critères subjectifs dans l'efficacité d'une carte. L'ensemble des expérimentations réalisées dans cette thèse a mis en avant le lien qui existait entre la perception de l'efficacité et les résultats obtenus aux tâches accomplies par les participants. Dans la majeure partie des cas, une carte efficace a été la mieux notée par les participants et inversement. Toutefois, ces expérimentations ont démontré entre autres que l'esthétisme, *c.-à-d.* les critères visuels purement subjectifs, a eu un réel impact sur l'appréciation de l'efficacité de la carte et ceci, malgré les erreurs d'estimation qui ont été précédemment détaillées. Si au départ, la question de l'esthétisme n'est pas clairement mentionnée, elle peut se concevoir à travers la définition subjective des participants concernant des paramètres de lisibilité, charge d'information, d'efficacité des cartes. Cette relation a été mise en évidence par les résultats de l'expérimentation #3. Une carte esthétique est également une carte qui, en lien avec l'efficacité perçue, offre de meilleurs résultats. Finalement, l'esthétisme est non moins défini comme une notion d'efficacité que comme une notion subjective qui rappelle que derrière la carte se trouvent un concepteur et un public.

Dans la littérature, cette relation entre l'esthétisme et l'efficacité d'une carte est souvent décrite comme dépendante. La carte doit être agréable à regarder et attractive (***Cauvin et al., 2007***) en appliquant certaines propriétés esthétiques. Jégou (***2013***) a mis en avant le lien entre l'œuvre d'art, ses propriétés esthétiques et leur application à la carte thématique. Il reprenait Pouivet (***2010***) pour introduire l'ensemble des propriétés visuelles intentionnelles et subjectives qui construisent l'image graphique dans son ensemble et qui permettent d'en faciliter le rapprochement avec les caractéristiques des objets du monde réel. Comme pour la philosophie, l'objet de l'esthétique se définit par des propriétés comme l'harmonie, l'équilibre, les proportions justes, le contraste ou encore le style que l'on applique aux formes graphiques simples ou complexes et qui permettront de qualifier une image « d'agréable à regarder ». Bien évidemment, ce fonctionnement de l'esthétique diffère en fonction du public. Il se manifeste également par la différence entre le comportement esthétique (contemplatif) et les comportements utilitaires et fonctionnels que le public peut avoir avec la carte. Selon Jégou (***2013***), cette première approche sous-entend que l'esthétisme serait une notion complètement subjective et déconnectée des propriétés physiques de l'objet. Or, la qualité esthétique des cartes ne s'arrête pas à cette seule appréciation subjective des lecteurs (***Kent, 2012***). Nombreux sont les manuels de cartographie qui explicitent le fonctionnement esthétique de toute image cartographique. La littérature a d'autant plus éclairé l'importance des aspects visuels, dans l'efficacité de la communication, de l'exploration de la carte et *in fine* de l'interprétation de son message. En intégrant ces paramètres, l'esthétisme joue un rôle sur la lisibilité des cartes et finalement la hiérarchisation des informations. Ainsi, les propriétés de l'esthétisme sont donc très utiles en cartographie, car elles sont étroitement liées à la perception visuelle de l'image et aux propriétés intentionnelles dont dépendent la formation, les conditions de lectures, la culture, etc. du lecteur. En complément de ces aspects fonctionnels, la carte affecte l'interprétation de son utilisateur par son aspect esthétique (***Keates, 1996***). Ces observations générales, bien que non exhaustives, laissent donc entrevoir l'implication de l'esthétisme en tant que variable subjective à part entière dans l'attrait et l'efficacité d'une carte. Cet esthétisme aura comme principal défaut d'occulter les erreurs d'interprétation que l'on retrouve tout au long des expérimentations.

De fait, le concepteur doit porter un intérêt particulier à l'amélioration esthétique de l'image cartographique et à sa mise en forme, en considérant notamment les retours d'expériences utilisateurs. Pendant longtemps, le paradigme implicite à la cartographie thématique et l'avènement des systèmes informatisés ont influencé la production de représentations très épurées, sans sensibilités (***Jégou, 2016***). Aujourd'hui, la production cartographique ne se limite plus au cercle restreint des géographes et des cartographes. Elle devient l'outil de visualisation des informaticiens, infographistes, médias, etc. Les outils contemporains, tels que les SIG ou le web, offrent de nombreuses possibilités pour la création de cartes originales. Autant d'avantages qui ont fondamentalement changé la façon de concevoir les cartes et qui ont aussi créé une véritable dépendance aux outils informatiques. Certes, ils permettent aujourd'hui de produire des cartes esthétiques en proposant des styles prédéfinis. Cependant, cet automatisme se fait au détriment d'une réflexion sur la nature des données et des objectifs de la représentation. En 2015, le rôle de l'esthétisme souffrait encore d'un dualisme entre l'art et les sciences (***Krygier, 2015***) alors qu'il s'inscrit au cœur du paradigme de la communication cartographique (***Jégou, 2016; Kent, 2012***). Sans esthétisme, la carte perd de son attrait malgré la grande utilité ou encore l'exactitude des données qu'elle peut transmettre. Une carte inesthétique, moins attirante ou moins agréable à lire, sera également moins favorable à la construction de la signature visuelle telle que définie dans les travaux de Ory (***2016***).

En conclusion, ces expérimentations contribuent à la compréhension du fonctionnement des représentations thématiques et approfondissent les retours d'expérience sur la cartographie rapide développée par les SEM.

- Elles permettent de tirer des enseignements sur les processus individuels, mais surtout collectifs qui traduisent la capacité des cartes à transmettre une information de manière efficace.

- Elles alimentent notamment l'analyse des conséquences de l'agrégation spatiale sur l'interprétation clairement exposée depuis les années 70 à travers quelques travaux pionniers (***Clark & Avery,1975 ; Openshaw 1977a, 1977b, 1978a, 1978b ; Goodchild, 1979***).

- Elles mettent également en évidence l'importance de l'esthétisme et tout l'intérêt que doit porter le cartographe à cette variable fondamentale à la transmission d'une information.

- Ces expérimentations permettent plus particulièrement de valider les apports théoriques de la sémiologie graphique sur la lecture et l'intégration d'un message cartographique, et ceci dans des conditions d'expérimentations favorisant un stress cognitif (temps de réponse limités nécessitant une analyse rapide des cartes) des participants. Le semi-régulier de points optimise donc la lecture des dommages aux petites échelles dans ces conditions particulières.

Enfin, une des principales difficultés de l'analyse des résultats est de faire la part des choses entre ce qui relève du caractère expérimental et ce qui relève des dispositifs déployés. Pour bien interpréter les résultats obtenus lors des différentes phases de l'expérimentation, une discussion sur les protocoles d'expérimentation s'impose.

11.2. Discussion autour des protocoles expérimentaux, forces et limites

11.2.1. Expérimenter les dimensions perceptives et informationnelles des cartes

Les expérimentations proposées ont d'original, de préciser les dimensions perceptives et informationnelles des techniques d'agrégation spatiale employées pour cartographier les dommages. Elles mettent en valeur la place intermédiaire et le rôle médiateur de la carte dans la communication d'une information ; et présentent l'intérêt d'une approche combinatoire qui ne se limite pas aux mesures mécanistes de la complexité visuelle des cartes. Elles intègrent finalement une spécificité qui témoigne de l'évolution de la réflexion dans les processus d'interprétation subjectifs aboutissant à une typologie des cartes résultantes de ces procédés (Figure 135).

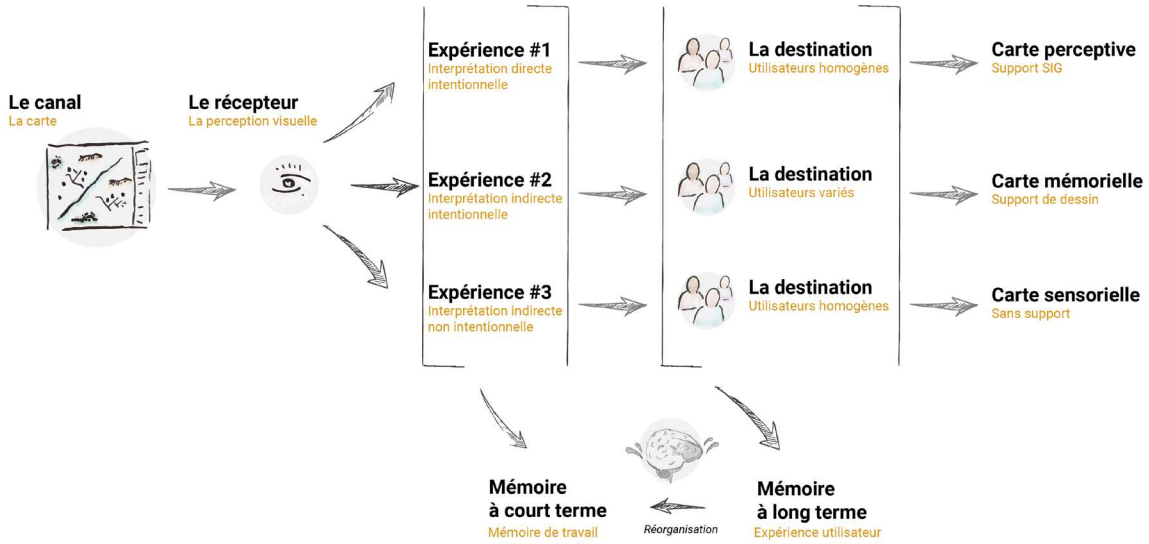


Figure 135 : Typologie des cartes résultantes des phases d'expérimentation cartographique de la thèse

La première expérimentation a permis de juger une interprétation directe intentionnelle. Le résultat a abouti à des cartes perceptives récoltées à partir des mesures quantitatives des données vectorielles réalisées sous SIG. La seconde expérimentation (cf. supra) a analysé une interprétation indirecte, mais toujours intentionnelle. Ce procédé a eu pour finalité la création de cartes mémorielles basées sur la mesure quantitative des données vectorielles réalisées sur papier. Durant la troisième et dernière expérimentation (cf. supra), les participants ont accompli un acte d'interprétation sensorielle non intentionnelle. L'agrégation des données vectorielles a abouti à la création de cartes sensorielles. En outre, chacune de ces expérimentations a été révélatrice du fonctionnement d'une mémoire de travail qui opère dès la vision de la carte, mais également d'une mémoire à long terme qui dépend de l'expérience de l'utilisateur, de ses connaissances, etc.

Pour cela, l'interprétation des résultats a pris en compte l'exercice dans sa globalité sans se limiter à l'individu seul. Ruffray (***2013***) fait d'ailleurs référence « à l'hypothèse qu'au-delà de la multiplicité des représentations particulières, il existe des mécanismes communs dans la connaissance et la perception ». En effet, chaque processus individuel, bien qu'unique dans sa relation avec la carte, fait ressortir une interprétation qui présuppose des normes introduites par la formation des participants ou encore leur environnement culturel et social (***MacEachren, 1994***).

11.2.2. Forces et faiblesses des protocoles d'expérimentation

Çöltekin (***2015***) souligne que tout protocole d'expérimentation a ses faiblesses et ses points forts, aucun n'est parfait, mais ils sont tous enrichissants. Cette sous-section donne ainsi un bref retour d'expérience sur les méthodes employées dans cette thèse en commençant tout d'abord par en déterminer les forces puis en montrant les limites.

Forces des protocoles d'expérimentation :

- La reproductibilité des protocoles : L'ensemble des protocoles a été réalisé avec pour objectif d'être reproductibles et transposables à d'autres thématiques que celle étudiée dans cette thèse. De plus, les outils déployés pour collecter les différentes traces interprétatives, intentionnelles ou non (cf. supra) ont permis de s'adapter aux participants et à leur niveau en cartographie tout en garantissant des données quantitatives de qualités. Les protocoles sont relativement simples et nécessitent peu de personnel dans leur exécution. Les expérimentations #1 et #3 ont pu être réalisées avec la présence d'un nombre limité d'observateurs/organisateurs (1 à 3 personnes). Ces expérimentations sont basées sur un questionnaire et des tâches peu complexes qui permettent d'intégrer une plus grande panoplie de participants. En outre, lorsque ces derniers sont issus de milieux professionnels variés, le protocole permet la création d'un profil utilisateur (PU) utile à la caractérisation des résultats obtenus.

- Les conditions d'expérimentation : Les différents protocoles ont été réalisés dans des conditions bien particulières qui ont permis de répondre au besoin de stimuler un stress propice à l'étude des cartes déployées en situation de *post*-crise. Pour cela, le temps a été une variable primordiale dans chacune des expérimentations. Dans les deux premières, le participant a bénéficié d'un temps imparti relativement court, entre 4 et 10 minutes, pour analyser les cartes. Dans la dernière, il a été chronométré. Ainsi, ces protocoles ont pour avantage d'être modulables et de permettre une mise sous-conditions des participants. En outre, cela permet de réaliser des expérimentations sur des temps relativement courts ce qui s'est montré particulièrement utile lors de l'expérimentation #2. Cette dernière présente par ailleurs l'intérêt d'être intégrée dans le cadre d'événements scientifiques et techniques autour d'un thème bien spécifique. De plus, ce genre d'événement est favorable à une émulation collective favorisant l'intégration de l'expérience par les participants. Un autre avantage réside dans le fait que toutes ces personnes ont répondu au questionnaire avec les mêmes conditions d'expérimentation. En dehors du colloque, il aurait été difficile de soumettre cette expérimentation à autant d'acteurs différents en un laps de temps aussi court (une seule matinée).

- Un outillage adapté à l'interprétation collective des participants : En dehors des protocoles méthodologiques, les SIG ont facilité considérablement la création des synthèses perceptives et mémorielles, notamment dans le cadre des expérimentations #1 et #2. Lorsque les participants sont coutumiers des SIG (cf. expérimentation #1), il est possible de profiter pleinement des fonctionnalités de saisie de ces outils pour faciliter et fiabiliser le traitement des dessins vectoriels. Quand ce n'est pas possible (cf. expérimentation #2), les SIG ont tout de même permis la

numérisation des polygones dessinés sur les supports-papier. Dans les deux cas, ils se sont montrés utiles à la réalisation de requêtes spécifiques, de l'intersection à la création de matrices cumulatives facilitant la discrétisation finale des zones de convergence et de divergence des variables étudiées. Ces procédés ont ainsi pour avantage de présenter la dilatation spatiale qui est produite par l'agrégation d'un ensemble de traitements cognitifs individuels répertorié sur une même carte. Une perte de précision qui contraste avec les limites précises que l'on obtient à l'échelle du tracé d'un individu. Ces résultats peuvent être superposés à d'autres données, comme l'analyse des experts, à des fins de comparaison. Ils communiquent également une nouvelle information comme les franges d'incertitude et des imprécisions qui émanent des évaluations collectives et qui apparaissent dans les cartes finales. Ces incertitudes font l'objet d'une discussion à part entière plus loin dans le chapitre (cf. infra 12.3).

En complément des SIG, les logiciels de capture oculométrique utilisés dans l'expérimentation #3 ont permis de déduire les zones de forte concentration ou les zones de difficultés. Ces zones reproduisent ainsi les processus pré attentifs et attentifs en se fondant sur une interpolation de la zone d'acquisition d'informations nettes (zone fovéale). Compte tenu du rôle important que peut jouer la variation des fonds de cartes, des couleurs, etc. dans la complexité visuelle de la carte (***Jégou, 2015***), la construction de modèles cartographiques propre à l'expérimentation, de façon similaire, s'est montrée particulièrement utile pour l'analyse de ces processus et leur comparaison entre techniques. Cette approche offre donc de nouvelles perspectives dans l'étude des cartes thématiques et surtout l'analyse des conséquences de l'agrégation spatiale sur la lecture et l'interprétation des utilisateurs.

Limites des protocoles d'expérimentation

Les protocoles expérimentaux présentent certaines limites, parfois importantes, qu'il convient d'expliciter et dont il faut tenir compte dans l'interprétation finale des données récoltées.

- La sélection du matériel d'étude : En tout premier lieu, il faut signaler que la sélection du matériel cartographique ne permet pas une analyse complètement exhaustive des différentes techniques employées par les services de cartographie rapide. Ainsi, les résultats obtenus dans cette thèse sont dépendants de cette sélection. Pour autant, elle intègre les principales techniques recensées par l'étude des cartes de dommages *post*-catastrophes (cf. supra 5.3). Cela nous amène à la récurrence des techniques analysées à travers les trois expérimentations. La spécificité des cartes produites pour analyser le suivi oculométrique par exemple n'a pas permis d'intégrer la technique des blocs urbains. Il est donc encore impossible de les comparer aux autres techniques sans procéder à des analyses complémentaires. Toutefois, cela démontre que cette technique est la moins reproductible de l'échantillon analysé puisqu'elle nécessite des données tierces (réseau routier) pour sa création.

- L'échantillonnage des participants : À l'instar de la typologie des cartes des ressentis et des représentations (***Arnaud, 2020***), il est nécessaire de collecter un grand nombre de représentations individuelles. Sans cela, il est difficile d'obtenir une représentation cognitive ou sensorielle synthétique d'une interprétation par un groupe d'individus. En considérant ce paramètre,

l'expérimentation #2 ne permet pas une analyse complètement exhaustive des groupes thématique : niveau de cartographie, catégorie d'acteurs. En effet, ces regroupements sont limités par la quantité de participants représentatifs de chacun des groupes. Il est donc nécessaire de compléter ce travail par des méthodes d'échantillonnage de personnes ciblées à enquêter, notamment les gestionnaires de crise. Pour cela, il serait intéressant de tester un autre canal d'enquête, comme les questionnaires en ligne, permettant de consulter un vaste groupe d'utilisateurs. Toutefois, ce type de protocole peut prendre beaucoup plus de temps pour réunir le nombre de participants nécessaire à la complétude de l'échantillon. Par ailleurs, il nécessite un suivi plus fin que celui dont nous avons bénéficié lors de l'expérimentation #2.

Autre élément à prendre en considération, la définition de sous-ensembles doit tenir compte d'un niveau de connaissance homogène entre les membres d'un même groupe, ce qui peut rapidement rendre complexes les processus d'échantillonnage. Entre autres, les profils utilisateurs des candidats de l'expérimentation #2 ont démontré que les membres d'un même groupe n'étaient pas formés de la même manière aux cartes et à leur lecture. Il est donc essentiel d'identifier les critères de représentativité pour construire un échantillon représentatif des différents utilisateurs de ces cartes. L'échantillon de participants de l'expérimentation #2 reste globalement représentatif des individus concernés par la gestion des risques et des crises. Un autre point à retenir concerne la sélection de participants pour les expérimentations #1 et #3. Le fait d'avoir un bon niveau en cartographie n'est pas sans conséquence sur les résultats obtenus. Pour rappel, les connaissances cartographiques, en lien avec leur activité professionnelle notamment, ont un véritable impact sur la lecture d'une carte. Il pourrait être judicieux de reproduire cette expérimentation auprès d'utilisateurs moins connaisseurs et de comparer les résultats obtenus. À titre de comparaison, les différences observées entre les zones mémorisées de l'expérimentation #2 démontrent bien qu'il existe un comportement différent à la lecture d'une information cartographique.

- Les limites techniques et interprétatives des données : D'un point de vue technique, le protocole d'expérimentation oculométrique offre de nombreuses possibilités d'analyse. Toutefois, il est important de noter les contraintes que représente un tel protocole. Malgré sa capacité de reproductibilité, l'utilisation du logiciel et du système d'oculométrie Tobii (cf. supra 10.1.2) à des fins d'analyse cartographique présente quelques limites. D'une part, la procédure d'affichage des cartes sur le logiciel ne pardonne pas l'erreur. Des doubles clics impromptus de la part du participant font passer les cartes sans pouvoir revenir en arrière. Il est donc important d'être rigoureux dans l'organisation de l'expérimentation. De plus l'extraction des données oculométriques se montre très chronophage. L'importante quantité de données rend difficile l'extraction individuelle des participants. Elle oblige le développement d'interfaces complémentaires afin d'analyser plus finement les résultats. En outre, le logiciel ne permet pas d'intégrer des coordonnées géographiques. Ces dernières seraient utiles à la fois pour augmenter la rapidité des traitements et étendre leur potentiel d'exploitation à d'autres traitements sous SIG. Malgré ces difficultés, la technologie du suivi oculométrique permet une analyse des processus pré-attentifs qui est essentielle à la compréhension de la lecture du message cartographique.

Outre les aspects techniques, il est important de considérer certaines limites à l'interprétation des résultats sur le suivi oculométrique. La fixation peut être interprétée de deux manières contradictoires (***Çöltekin et al., 2010***). Elle marque soit l'intérêt du regard des participants sur un élément qu'ils connaissent et trouvent utile ou bien le sentiment d'incertitude et donc le besoin de confirmer les informations qu'ils ont trouvées (***Goldberg & Kotval, 1999***). Jacob et Karn (***2003***) font d'ailleurs la distinction entre une tâche d'encodage et une tâche de recherche d'informations. Pour Golberg et Kotval (***1999***), la première indique un plus grand intérêt des participants, alors que la seconde indique une inefficacité ou une difficulté à reconnaitre l'élément ciblé. À ces observations, d'autres chercheurs soulignent que ces résultats peuvent qualifier la tendance des participants à extraire des informations en fonction de leur importance perceptuelle plutôt que de leur pertinence thématique (***Çöltekin et al., 2010; Fabrikant et al., 2010***). Ces approches sont autant de façon d'entrevoir les résultats de ce test. Comme le met en avant Çöltekin et al. (***2010***), il est dès lors important de pouvoir de comparer systématiquement les méthodes, les seuils et les outils utilisés pour l'analyse des enregistrements des mouvements oculaires afin d'établir des repères et des lignes directrices pour ce genre de travail empirique.

Pour conclure cette sous-section, les forces et faiblesses des protocoles expérimentaux sont détaillées dans le Tableau 17. Loin d'être complètement exhaustif, il aborde néanmoins un retour d'expérience critique tout en intégrant d'ores et déjà des pistes d'amélioration et différentes perspectives utiles à des expérimentations futures.

Tableau 17 : Forces et faiblesses des protocoles expérimentaux et pistes d'améliorations et perspectives

#	Points forts	Points faibles	Améliorations et perspectives
1	+ Groupe homogène de participants + Simplicité d'exécution + Simplicité des tâches + Bonne intégration de l'expérimentation par les participants + Analyse des capacités d'interprétation visuelle + Dessin vectorisé par les participants directement sous SIG + Stimulation des conditions de stress + Bonne reproductibilité	- Réponses ouvertes pour l'estimation les secteurs les plus et les moins touchés - Matériel cartographique échantillonné important - Risque de fatigue des participants - Risque d'apprentissage cartographique des participants - Échantillon homogène de participants	• Compléter par des réponses fermées pour les tâches d'estimation et d'identification des secteurs les plus et les moins touchés • Limiter le nombre de cartes à analyser • Diversifier les secteurs d'études afin d'éviter les processus d'apprentissage cartographique • Comparer les résultats avec des participants moins expérimentés en cartographie
2	+ Groupe hétérogène de participants + Forte mobilisation sur un temps court + Récolte instantanée des résultats + Simplicité de préparation + Simplicité d'exécution + Simplicité des tâches + Création d'un profil utilisateur (PU) + Bonne intégration de l'expérimentation par les participants (Atelier participatif) + Analyse des capacités de mémorisation + Stimulation des conditions de stress + Bonne reproductibilité	- Réponses non limitées pour l'estimation des secteurs les plus et les moins touchés - Grande quantité de données à vectoriser manuellement - Échantillon déséquilibré entre les différents groupes (catégorie d'acteurs et niveau cartographique) - Niveau cartographique hétérogène au sein des catégories d'acteurs - Dépendance de la qualité du matériel de projection, de la disposition de la salle et de sa capacité d'accueil - Risque de fatigue des participants	• Limiter le nombre de réponses à fournir pour l'estimation des secteurs les plus touchés et les moins touchés • Réaliser une enquête en ligne pour maximiser l'équilibrage des groupes échantillonnés. • Utiliser les PU pour définir des enquêtes et des tâches plus spécifiques à chaque groupe d'utilisateurs
3	+ Groupe homogène de participants + Robustesse technique et scientifique du protocole + Simplicité de l'expérimentation avec les participants + Bonne intégration de l'expérimentation par les participants + Grande quantité de données récoltées + Analyse des capacités sensorielles + Permet de mesurer le temps, fréquence de passage du regard + Permet d'analyser les stratégies du regard de chaque participant + Bonne reproductibilité	- Préparation chronophage en amont - Mise en place complexe en fonction du nombre de participants - Disponibilité du matériel et mise en place - Ambiguïté des interprétations des zones de forte concentration (erreurs, recherche, etc.) - Grande quantité de données à traiter avec peu de possibilité d'intégration sous SIG - Nécessite la mise en place de système tiers pour l'exploitation des résultats - Risque d'erreurs techniques - Risque de fatigue des participants - Risque d'apprentissage cartographique des participants - Échantillon homogène de participants	• Comparer les résultats avec des participants moins expérimentés et plus expérimentés en cartographie • Automatisation de l'analyse des résultats de l'Eye-tracker • Comparaison de l'importance de la légende dans le processus de lecture des cartes

Chapitre 12 : Des résultats exploitables pour la cartographie des dommages *post*-catastrophes

12.1. Vers une visualisation continue des données géographiques à travers la montée ou la descente d'échelle

12.1.1. L'importance du changement d'échelles pour représenter les dommages

Le changement d'échelle fait appel à plusieurs concepts : l'approche multi-échelle (multi-scalaire), multi-résolution et multi-niveau (***Forriez, 2010***). Ces concepts reposent sur la prise en compte de plusieurs niveaux d'analyse de l'information géographique. L'approche multi-échelle est développée à l'origine par Yves Lacoste (***Lacoste, 2014***) qui décrit comment chacune de ces échelles fait apparaître un certain nombre de phénomènes grâce à des processus d'emboitement. Ces processus déterminent ce que l'utilisateur peut voir et donc interpréter en fonction du niveau de détail que l'on souhaite, ou que l'on peut afficher en fonction des ordres de grandeur des objets géographiques. De cette manière, la dynamique d'échelle permet d'étudier une ou toutes les parties d'un phénomène et d'en dégager des ensembles. Dans notre cas, une catastrophe s'inscrit simultanément à plusieurs échelles, du bâtiment à la commune, jusqu'à concerner un ensemble de territoires. Tant est si bien qu'à l'instar du risque, les conséquences d'une catastrophe s'insèrent sous de nombreux aspects dans une dimension « transcalaire » (***Raffestin, 2019***), c'est-à-dire qu'elles « intéressent toutes les échelles géographiques ». En fonction de ces échelles, les besoins ne sont pas les mêmes, tout comme les utilisateurs. Cependant, les processus de gestion des risques et plus particulièrement des crises s'inscrivent dans une dynamique d'interaction entre ces différents niveaux. Ainsi, aucune échelle n'est indépendante des autres et il est nécessaire d'aborder la représentation des dommages à travers une approche multiscalaire. Cette dernière nous conduit à voir la carte non plus comme un outil statique contraint à des formes de visualisation bloquées dans l'espace et le temps, mais comme une interface dynamique pour visualiser une ou plusieurs informations géographiques interdépendantes.

L'approche multi-niveau se définit par la mise en relation des niveaux d'observations et des niveaux d'organisation (***Mathian & Piron, 2001***). Elle consiste donc à redéfinir les changements de tailles d'un objet lors du passage à des niveaux supérieurs ou inférieurs. Cette approche s'avère plus utile lors des processus de réorganisation de ces entités et de leur agrégation à un premier niveau de mailles puis progressivement dans la relation de dépendance entre les différents niveaux de mailles successifs.

Lors de la conception de notre représentation par semi-régulier de points, le choix d'une restructuration carroyée du territoire a été intégré à la notion d'ampleur des événements majeurs, c'est-à-dire la capacité à s'étendre spatialement. Cette structuration de l'espace se rapproche par définition d'une approche multi-résolution. Cette dernière consiste « à étudier un objet ou une donnée géographique à plusieurs résolutions prédéfinies. Elle permet en outre de trouver quels sont les bons niveaux d'observations possibles » (***Forriez, 2010***). Ces bons niveaux d'observations seront relatifs aux besoins des utilisateurs (forces de secours, décideurs locaux, ONG, etc.) et à leurs différentes échelles d'intervention (opération

sur le terrain, à l'échelle d'une commune, d'un département, etc.). Le choix d'un maillage régulier a pour avantage d'interpréter l'emprise spatiale de l'événement en donnant une vision synoptique à la fois des dommages et des causalités, mais également de permettre une descente d'échelle grâce à des résolutions plus fines de sa structure. Ainsi, travailler sur une représentation à plusieurs échelles amène à s'interroger sur les critères qui vont assurer sa cohérence et sa lisibilité. Le premier concerne la résolution des mailles et les dynamiques d'emboitement spatial. Une résolution adaptée réduit les écarts statistiques aux échelles les plus fines tout en simplifiant la donnée aux échelles les plus larges. Il convient de rappeler que l'échelle se distingue de la résolution (***Forriez, 2010***). La première « désigne une catégorie générale, tandis que la seconde correspond plutôt à une variable permettant de quantifier ce concept d'échelle ». De ce fait, une des principales problématiques revient à trouver la taille optimale des mailles à chaque niveau cartographique. Ces dimensions vont dépendre de la discrétisation de nos informations, mais aussi, de l'étendue (dimension maximale du symbole) de notre variable de taille qui exprime les quantités. Par ailleurs, l'utilisation d'un carroyage régulier pour l'analyse d'un semi de points impose un critère de distribution de la donnée. Plus elle est concentrée, plus l'influence de la taille de la maille sera importante.

Ainsi, les notions d'échelle et de résolution impliquent également celles des limites. Toutes analyses fondées sur les changements d'échelles ne conservent un sens qu'à partir du moment où elles respectent la morphologie et la logique de leur espace support. À un certain niveau, l'agrégation n'est plus utile, car la résolution sera trop proche des objets géographiques (grandes échelles) ou inversement trop éloignée (petites échelles). Un autre point important concerne le principe d'emboitement dont vont dépendre les opérations de transfert d'échelle. Ces dernières permettent une mise en relation raisonnée entre le semi de points et les tendances que l'on souhaite faire ressortir aux petites échelles. Ces opérations sont aujourd'hui « facilitées » par les SIG. Ils assurent la compatibilité des mesures de localisation et le test d'adéquation (variance, indice de distribution, etc.) vis-à-vis de la distribution initiale.

12.1.2. Assurer l'emboitement statistique d'un quadrillage géométrique

Le principal atout du semi-régulier de points se trouve dans l'utilisation du carroyage régulier. Ce dernier offre la possibilité de produire une analyse basée sur un système d'échelles standardisées et appropriées aux traitements des dommages. Réalisée sous SIG, cette approche consiste en une succession d'agrégation de la donnée à chaque réseau de mailles. Les dimensions et les positions de chaque niveau de mailles sont définies afin d'assurer l'emboitement statistique des niveaux de dommages et de la quantité de bâtiments concernés. Ce processus est primordial puisqu'il rend comparable cartographiquement les résultats de l'agrégation des différents niveaux de carroyage. Lorsque des mailles s'emboitent parfaitement dans leur géométrie on parle de maillage dyadique, c'est-à-dire que la taille de la maille est agrandie successivement d'un facteur deux (Figure 136, a).

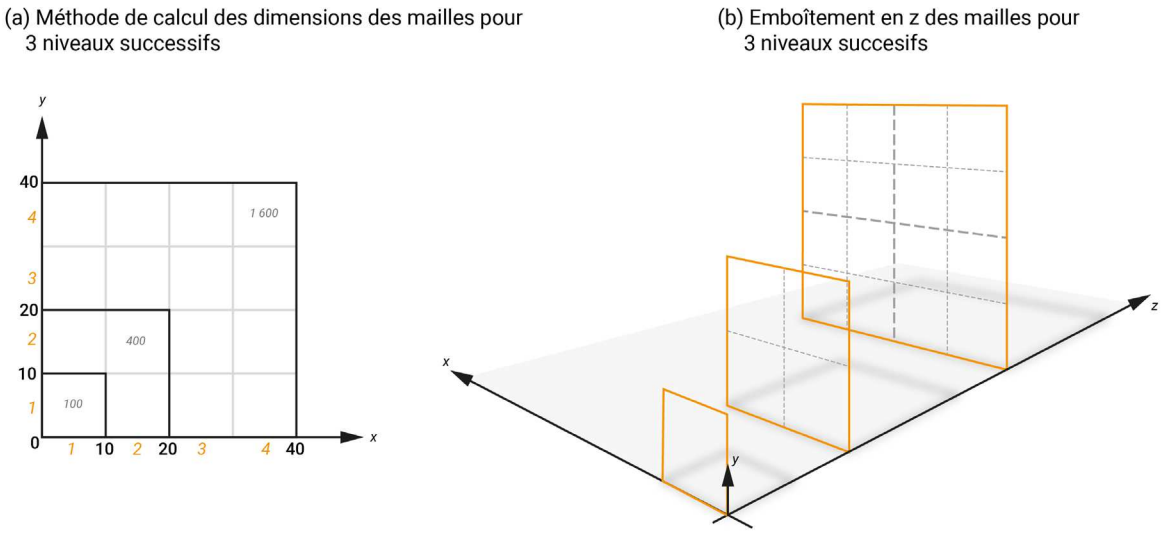


Figure 136 : Méthode de calcul des dimensions des mailles pour 3 niveaux successifs (a) et emboitement en z des mailles pour ces 3 niveaux (b)

Selon ce principe, plus la maille est grande et plus la situation qui en résulte dépend de la distance à une masse d'informations importantes. Ce faisant l'information agrégée est fortement lissée par les traitements statistiques. La variation de taille des mailles doit donc prendre en compte l'emboitement des niveaux (Figure 136, b). Dans notre exemple, chaque niveau est deux fois plus large que celui qui le précède, et donc naturellement deux fois plus fin que le suivant. Pour assurer l'emboitement des différents niveaux, il nous faut nous assurer d'avoir un x et y de départ identique. Dans notre cas, un maillage hexagonal est utilisé afin de profiter de ses capacités techniques et visuelles. Toutefois, ce choix n'est pas exempt de contraintes lorsqu'il s'agit d'emboitement et de processus de comptage (***Forriez, 2010***). Contrairement à l'emboitement géométrique des carrés, les différents niveaux de grilles hexagonales ne s'emboitent pas (Figure 137). En effet, l'utilisation de grilles carrées a pour avantage de résumer simplement les données agrégées aux surfaces de comptages des niveaux inférieurs. Les grilles hexagonales, quant à elles, doivent intervenir sur les équations des droites pour résoudre ce problème et fournir des résultats proches des modèles carrés. Cependant, cette problématique touche principalement les méthodes où le calcul prend en considération la donnée agrégée aux mailles inférieures.

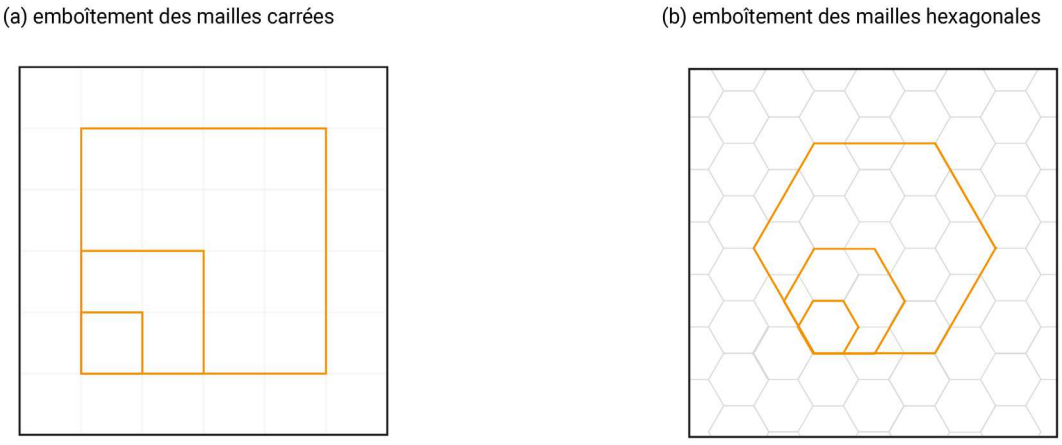


Figure 137 : Emboitement des mailles carrées (a) et des mailles hexagonales (b)

Nous avons opté pour une solution plus simple qui ne ralentit pas les processus de calcul. Les surfaces de comptages suivent une logique d'emboitement des formes à travers les échelles, décalées en *x* et en *y* pour générer le modèle que l'on observe en Figure 138, b. Pour cela, plusieurs niveaux de boites englobantes, ou *Bounding Box* (Bbox) en anglais, sont générés à partir des coordonnées initiales d'une aire d'étude prédéfinie. Cela peut être une limite communale ou insulaire par exemple. Chacune de ces Bbox englobe l'ensemble de l'aire d'étude prédéfinie. L'objectif final est de produire plusieurs niveaux de Bbox emboités en considérant un décalage progressif en *x* et *y*. Ainsi, la génération de mailles pour chaque niveau utilise un point d'ancrage qui subit une réduction spatiale de moitié par rapport à la différence qui caractérise l'espacement des Bbox supérieures. Ceci a pour effet de produire l'emboitement des mailles entre les différents niveaux.

La génération de ces Bbox et les dimensions des mailles sont définies afin de s'adapter aux référentiels de projection web Mercator utilisés notamment par Google Maps, Esri, Bing Maps, ou Géoportail. Ce référentiel comporte 21 niveaux de zoom correspondants à la pyramide des caches d'images des standards WMTS (Tableau 18).

Tableau 18 : Paramètres spécifiques à la diffusion mondiale web Mercator (EPSG : 3857)

Paramètres							Échelle de visualisation	
Nv	**Tuile (m)**	**Pixel (m)**	**ScaleDen**	**Hauteur hex (m)**	**Largeur Hex (m)**	**Aire (m²)**	**Min**	**Max**
0	40 075 016,69	156 543,03	559 082 264	2457600	2837792	5,2306E+12		503 174 038
1	20 037 508,34	78 271,52	279 541 132	1228800	1418896	1,3077E+12	503 174 037	251 587 019
2	10 018 754,17	39 135,76	139 770 566	614400	709448	3,2691E+11	251 587 018	125 793 509
3	5 009 377,09	19 567,88	69 885 283	307200	354724	8,1728E+10	125 793 508	62 896 755
4	2 504 688,54	9 783,94	34 942 642	153600	177362	2,0432E+10	62 896 754	31 448 377
5	1 252 344,27	4 891,97	17 471 321	76800	88681	5108025678	31 448 376	15 724 189
6	626 172,14	2 445,98	8 735 660	38400	44341	1277006419	15 724 188	7 862 094
7	313 086,07	1 222,99	4 367 830	19200	22170	319251605	7 862 093	3 931 047
8	156 543,03	611,50	2 183 915	9600	11085	79812901,2	3 931 046	1 965 524
9	78 271,52	305,75	1 091 958	4800	5543	19953225,3	1 965 523	982 762
10	39 135,76	152,87	545 979	2400	2771	4988306,33	982 761	491 381
11	19 567,88	76,44	272 989	1200	1386	1247076,58	491 380	245 690
12	9 783,94	38,22	136 495	600	693	311769,145	245 689	122 845
13	4 891,97	19,11	68 247	300	346	77942,286	122 844	61 423
14	2 445,98	9,55	34 124	150	173	19485,572	61 422	30 711
15	1 222,99	4,78	17 062					
16	611,50	2,39	8 531					
17	305,75	1,19	4 265					
18	152,87	0,60	2 133					
19	76,44	0,30	1 066					
20	38,22	0,15	533					
21	19,11	0,07	267					

Le tableau ci-dessus indique pour chaque niveau de zoom, sa correspondance à une échelle cartographique, sa résolution de tuile ainsi que les largeur et hauteur d'une maille hexagonale. Le tableau intègre également l'aire des mailles (en m²), calculée depuis Qgis, et les échelles de visualisation des

différents niveaux de carroyage développés par le LAGAM dans le cadre du projet C3AF[41]. Ces dernières servent à définir leur ordre d'apparition dans un SIG, mais également et surtout dans leur intégration aux outils de géovisualisation web. À chaque niveau (Figure 138, a), les valeurs de dommages sont recalculées sous SIG à partir des points (bâtiments) qui intersectent la nouvelle emprise spatiale des mailles dont les aires ont doublé par rapport au niveau inférieur. Cela revient à produire une mesure d'emboitement similaire aux processus d'intersection des mailles inférieures (Figure 138, b).

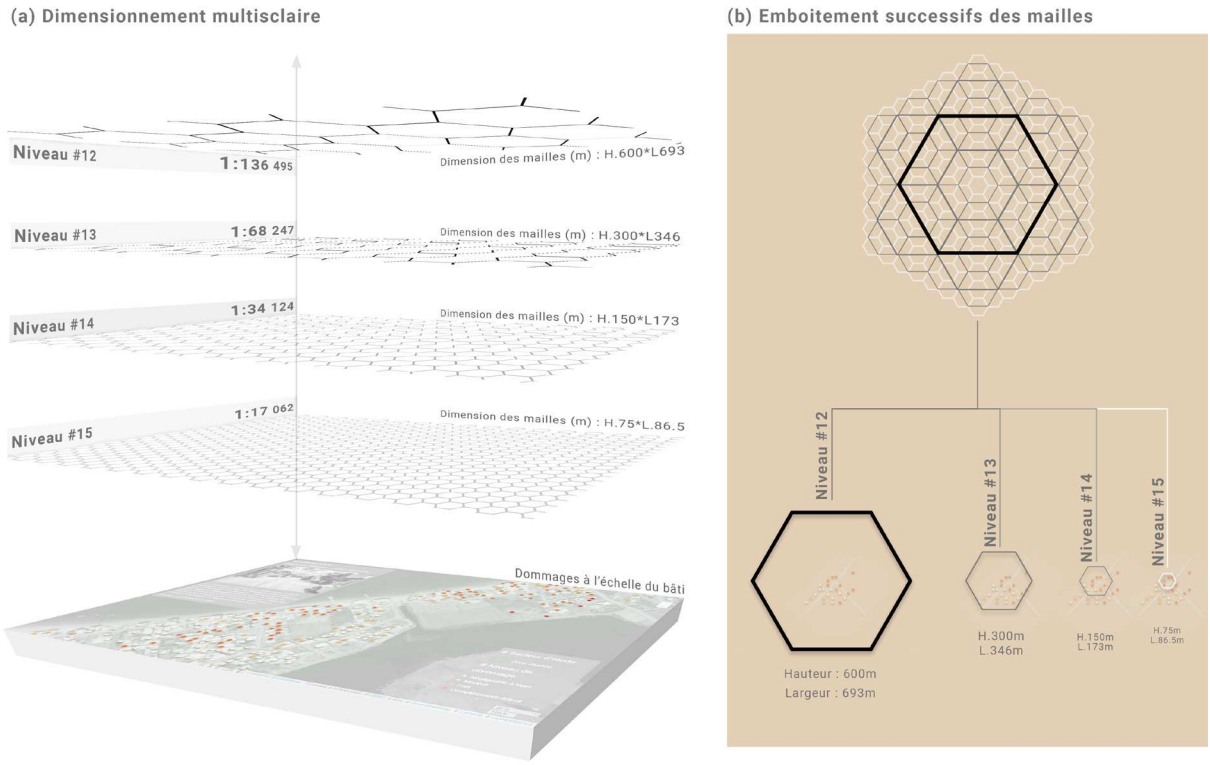


Figure 138 : Imbrication multiscalaire des carroyages hexagonaux

Cette méthode met en évidence la structuration et l'organisation des dommages à chaque niveau spatial en simplifiant ou affinant la donnée, lors de la descente ou la montée d'échelle. **Cette vision graduée interroge l'influence des configurations territoriales et par conséquent, l'hétérogénéité des espaces géographiques (type d'occupation du sol, topographie, maillage urbain, etc.), d'où l'intérêt de s'affranchir des maillages administratifs**. La méthode se concrétise à travers la Figure 139 qui illustre l'emboitement des mailles sur deux niveaux successifs (1 : 68 247 et 1 :34 124) jusqu'à présenter l'information à l'échelle du bâti, ici représenté à sa surface individuelle. Cette méthode considère ainsi qu'aux échelles supérieures au 1 : 20 000e la généralisation des dommages perd son intérêt au profit d'une précision plus fine.

[41] *https://c3af.univ-montp3.fr/*

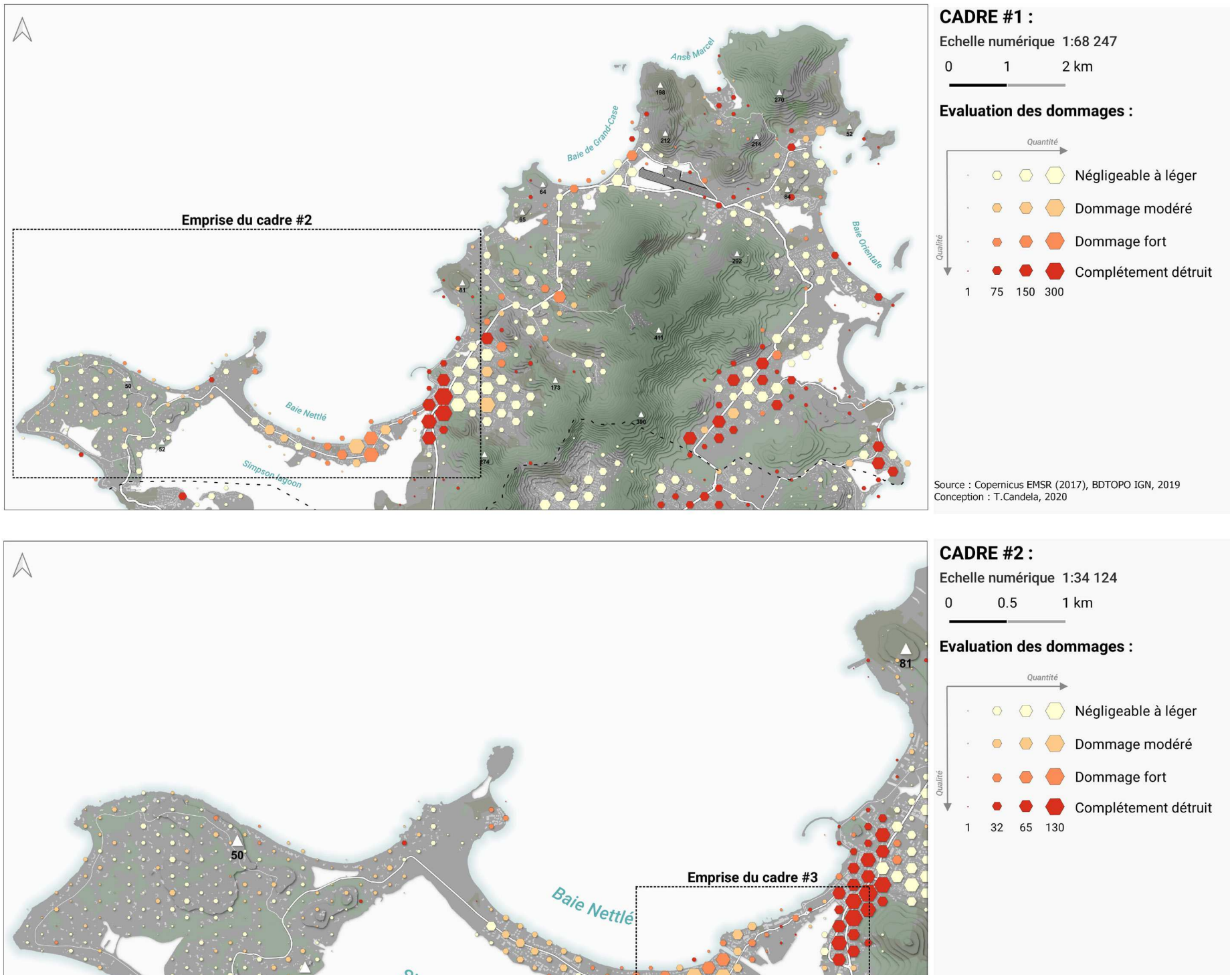


Figure 139 : Exemple d'agrégation à travers 3 échelles cartographiques, de l'échelle synoptique à celle du quartier

12.1.3. *Application à la cartographie intégrée d'un territoire cycloné (Saint-Martin, ouragan IRMA, 2017)*

La méthode du semi-régulier de points et son application multi-échelle peut être déployé pour de nombreux applicatifs. Elle permet entre autres d'élaborer des indicateurs spatio-temporels stables auxquels il est possible d'agréger plusieurs informations. Cela peut-être par exemple, des indicateurs socio-économiques, de pillage, etc. Afin d'illustrer nos propos, nous proposons une première approche expérimentale de cartographie intégrée d'un territoire cycloné (Figure 140) en prenant le cas de Saint-Martin à la suite du cyclone Irma (septembre 2017). Cette cartographie a intégré trois informations : les dommages, l'aléa et les enjeux exposés. Les dommages ont été représentés par un semi-régulier de points proportionnels. Le maillage ayant servi de support à l'analyse des dommages a été utilisé pour visualiser la quantité d'enjeux exposés et le niveau d'aléa de submersion. Concernant la quantité d'enjeux exposés, celle-ci a été représentée à partir du nombre de bâtiments indifférenciés extrait de la base de données BD TOPO IGN (2017). Il est visualisé au moyen de différents niveaux de gris qui colorisent la surface des mailles. L'aléa, quant à lui, a été calculé à partir du pourcentage de surface de chaque maille touchée par les différents niveaux de hauteurs d'eau recensés (Cerema & DEAL Guadeloupe, 2017). Il est représenté par l'épaississement progressif des contours des mailles qui recensent des zones submergées. En cumulant ces trois informations, la figure met ainsi en évidence les zones à forts enjeux exposés à l'aléa cyclonique et aux phénomènes marins induits ; et permets de confronter visuellement ces données avec les niveaux de dommages observés par Copernicus EMS en septembre 2017.

Nous proposons également une autre application, dédiée cette fois-ci, au suivi des activités de la reconstruction à Saint-Martin (Fr) durant la période de mars 2018 à mars 2019 (Figure 141). Les données sont issues du service EMSN049 (2018) assuré par le programme Copernicus pour une durée de 2 ans après le passage du cyclone. La stabilité du carroyage et du semi-régulier de points a permis d'illustrer les dynamiques spatio-temporelles de la reconstruction. La Figure 141 (a) agrège les activités de reconstruction sur une zone établie entre Les Terres Basses et Marigot sur un intervalle de 6 mois. Elle montre le taux et le type d'activité observés (déblaiement, en reconstruction, reconstruit, nouveau bâtiment) par maille ainsi que le niveau d'endommagement le plus fréquent. Ces cartes mettent en avant certaines caractéristiques géographiques du territoire. Les Terres Basses, par exemple, se caractérisent par des dommages plus faibles et des activités de reconstruction plus importantes en comparaison de Sandy Ground. Pour cet autre secteur, les activités de déblaiement persistent encore un an et demi après le passage du cyclone Irma. La topographie, les dommages importants, l'habitat plus précaire et peu assuré expliquent l'évolution lente de ce secteur vis-à-vis de Terres Basses. Cette analyse est confortée par la Figure 141 (b). Cette dernière présente le taux d'évolution de la reconstruction des bâtiments endommagés sur la période de mars 2018 à mars 2019. L'analyse considère uniquement les activités qui concernent la reconstruction (en cours ou achevée) et les nouveaux bâtiments. Certains secteurs bénéficient d'un plus fort dynamisme dans les efforts de reconstruction ; c'est notamment le cas, de Terres Basses, Anse Marcel, Cul-de-sac ou encore Hope Estate.

CARTOGRAPHIE
d'un territoire cyclone

Kilomètres

0 — 1 000 — 2 000

NIVEAU DU DOMMAGE :

- Négligeable à léger
- Dommage modéré
- Dommage fort
- Complétement détruit

NIVEAU D'ALÉA SUBMERSION :

- Niveau d'aléa faible
- Niveau d'aléa modéré
- Niveau d'aléa fort

QUANTITÉ DE BÂTIMENTS EXPOSÉS :

- Faible quantité
- Quantité modérée
- Forte quantité
- Très forte quantité

QUANTITÉ DE BÂTIMENTS TOUCHÉS :

- Faible quantité
- Quantité modérée
- Forte quantité
- Très forte quantité

SOURCE :
Evaluation des dommages : Copernicus EMS232 (2017)
Quantité de bâtiments touchés : Copernicus EMS232 (2017)
Niveau d'aléa submersion : Cerema & DEAL Guadeloupe (2017)
Niveau d'enjeu exposé : BD TOPO IGN (2017)
Conception : Candela T., 2020

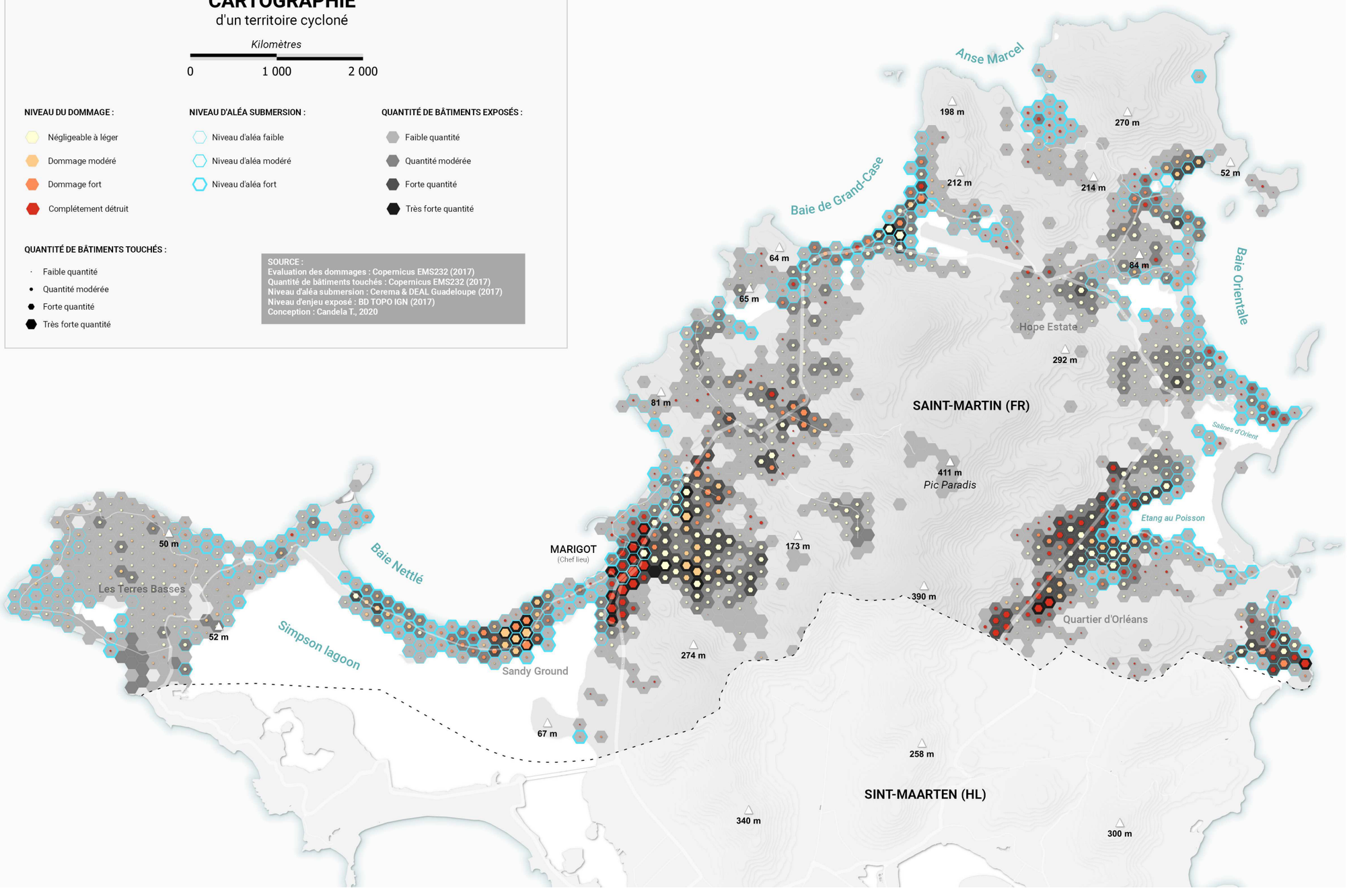


Figure 140 : Cartographie intégrée d'un territoire cyclone

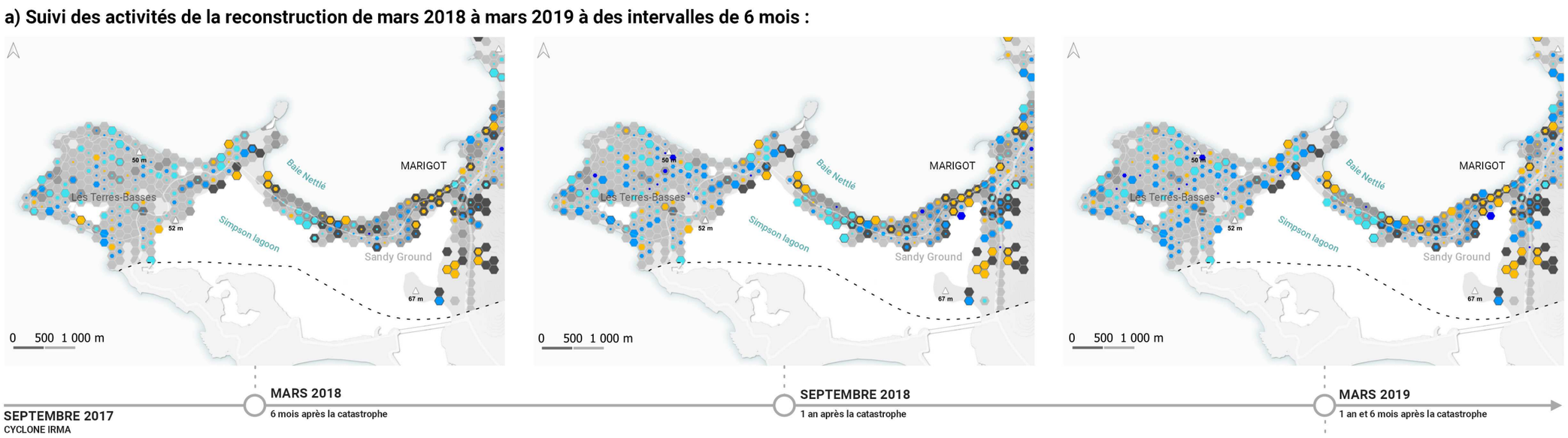


Figure 141 : Suivi de la reconstruction post-Irma (Sept. 2017) sur Saint-Martin (Fr) de mars 2018 à mars 2019

12.2. De la carte numérique statique à la carte numérique dynamique

12.2.1. Création d'un support dynamique pour le transfert des connaissances et des retours d'expérience

Expérimenter l'information préventive par les modèles de diffusion numériques

L'état de l'art nous a appris que la cartographie était utilisée à diverses fins et notamment pour un usage informatif, afin de sensibiliser les populations exposées aux risques (cf. supra 2.2.5). Cette information des populations a pour objectif de diminuer les vulnérabilités humaines et d'améliorer les comportements (***Douvinet et al., 2013***) notamment, par le transfert de connaissances sur les risques et les événements passés. La carte joue alors un rôle essentiel dans la diffusion d'une information spatialisée sur les aléas, les enjeux exposés et leur vulnérabilité (***Douvinet et al., 2013***). Chesneau et Ultsch (***2010***) ont mis en avant que les productions cartographiques dédiées à l'information préventive étaient surchargées visuellement et ne permettaient pas un repérage aisé de son quartier ou habitation, car les seules échelles proposées étaient celles de la ville. Encore aujourd'hui, cette information préventive, lorsqu'elle est représentée sous la forme de cartes, est majoritairement statique et ne permet que peu d'interactions avec le public intéressé.

Néanmoins, l'apport des technologies du web et des SIG a favorisé l'émergence d'outils de visualisation plus interactifs. Roche et al., (***2013***) ont mis en avant l'intérêt que représentent ces supports par rapport aux moyens traditionnels. Ils permettent de diffuser instantanément un plus grand nombre d'informations que la radio ou encore la télévision tout en améliorant le niveau d'interaction avec le public. De plus, l'utilisateur peut revenir et visionner les informations quand il le souhaite. Le site internet « Géorisques » du gouvernement[42] est un exemple de cartographie web dédié à l'information des populations. Il s'agit d'une cartographie à l'échelle nationale, ouverte au public, traitant des différents types de risques selon les territoires français. On retrouve de nombreuses cartes interactives sur les PPR à des échelles d'administration infra communale. L'utilisateur peut alors visualiser les zonages réglementaires, à différents seuils de zoom et jouer avec l'opacité des fonds cartographiques [43] ou encore le niveau des zones inondables[44]. Les cartes interactives du DICRIM de Saint-Étienne[45] sont aussi des exemples de ce qui peut être réalisé à l'échelle d'une collectivité. L'une des cartes est conçue pour présenter le risque d'inondation potentiel actuel tandis qu'une autre permet de faire l'inventaire des événements historiques dont les premières références datent de 1587 à nos jours (***Chesneau & Clément, 2013***). À travers cet exemple, il s'agit de capitaliser et valoriser les documents d'archives dont disposent les institutions locales (article, gravure, photo, vidéo bande son, etc.).

Cependant, ces cartes interactives, à part de rares exceptions, sont utilisées principalement à des fins d'inventaire. Elles n'exploitent pas complètement les avantages de la cartographie dynamique et interactive. Par ailleurs pour être pleinement efficaces, ces supports doivent s'adapter à la pluralité des

[42] *https://www.georisques.gouv.fr/cartes-interactives#/*

[43] *http://cartelie.application.equipement.gouv.fr/cartelie/voir.do?carte=IAL&service=DRIEA_IF#*

[44] *https://cartoviz.institutparisregion.fr/?id_appli=zonesinondables&x=655917.5645689655&y=6860330.539645861&zoom=7*

[45] *http://saint-etienne.fr/extrasig/intra_wm/applis/Dicrim/Dicrim.php?mode=inondation*

supports de visionnage (***Roche et al., 2013***). Ce constat l'est d'autant plus qu'aujourd'hui le visionnage de ces informations se fait principalement *via* les téléphones portables. Par ailleurs, ces cartes sont diffusées via le web et les applications cartographiques associées. De fait, les utilisateurs sont dépendants d'un accès internet suffisamment performant pour en visionner le contenu. À cela se rajoutent les contraintes de maintenance et de mise à jour des données. Malgré ces aspects techniques, ce type de cartes offre de nombreuses capacités de visualisation, d'exploration et d'interaction avec du contenu multimédia dédié à l'enrichissement de l'expérience et des connaissances de l'utilisateur. Ces aspects rejoignent de nombreuses perspectives de l'information préventive qui cherchent à favoriser l'intégration d'une culture du risque. Toutefois, l'ensemble de ces produits se confronte aussi à certains problèmes abordés dans l'état de l'art, concernant les règles de sémiologie graphique et de cartographie (cf. supra 4.2.3).

Afin d'être efficace, la construction de tel support cartographique à des fins d'information préventive doit débuter par une démarche réflexive (Figure 142). On s'interroge sur les données disponibles, sur les transformations et les méthodes d'intégration nécessaires et pertinentes pour les exploiter cartographiquement et ne pas surcharger les sens (visuels et cognitifs) de l'utilisateur tout en profitant des avantages offerts par le géoweb. En plus de cette approche réflexive, ce travail cartographique doit faire l'objet d'une concertation et/ou co-construction avec les acteurs concernés (institutions locales, populations). En cela, les enquêtes menées à Saint-Martin après l'ouragan Irma ont démontré que la population est un maillon essentiel de la réduction des conséquences de la catastrophe et de la capacité de redressement des territoires (***Defossez & Gherardi, 2020***). Cette remontée de terrain permet de compléter le travail de traitement des archives en collectant des savoirs et des mécanismes propres à chaque territoire. Cette prise en compte favorise une réduction des vulnérabilités et une meilleure résilience. En traduisant les savoirs et les bonnes pratiques vernaculaires sous la forme d'informations géographiques dynamiques et en les croisant avec les dispositifs de sauvegarde mis en place par les autorités locales (plan d'évacuation, site refuge, etc.), l'information préventive offre vers de nouvelles perspectives d'apprentissage tout en promouvant des supports facilement déployables et partageables sur internet.

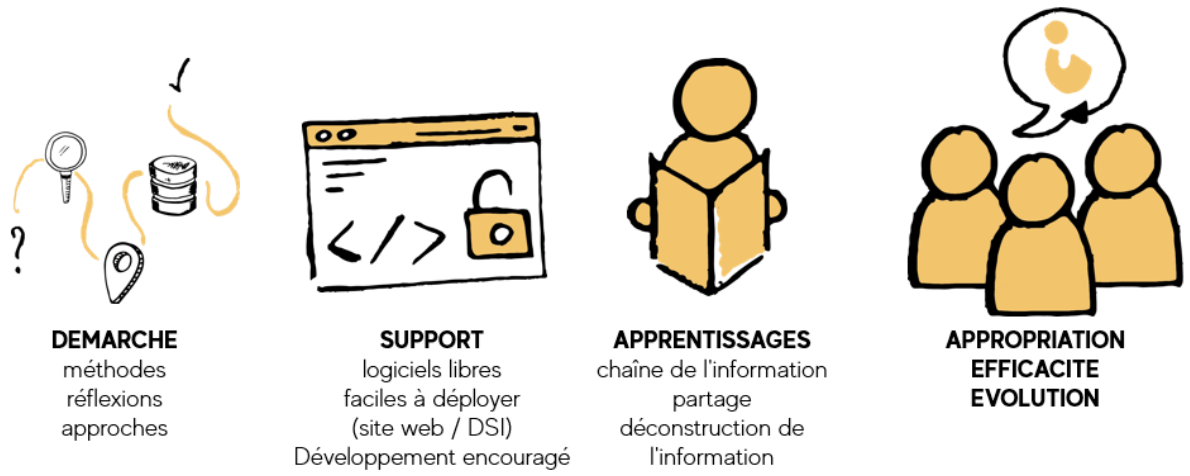


Figure 142 : Le transfert des connaissances pour l'information préventive (RisCrises, 2020)

Retour d'expérience cartographique à la suite du cyclone Irma (2017), le cas de Saint-Martin

La cartographie des dommages *post*-catastrophes vient en appui aux processus de réponses opérationnelles qui suivent le pic aigu de la crise (cf. supra 3). Cependant, leur usage peut clairement être étendu à la communication externe puisque les cartes produites sont par la suite diffusées au grand public. Par ailleurs, apparaît une implication grandissante, mais moins connue, du public dans la conception des cartographies de crise, comme lors du séisme de 2010 en Haïti (***Giroux, 2012; Mericskay & Roche, 2011; Roche et al., 2013***).

Au-delà de leurs applications opérationnelles, les données satellitaires sont donc une aubaine dans la construction de retours d'expériences. Ces données peuvent être employées en appui à la sensibilisation des populations. Chaque activation de la CHARTE ou encore de Copernicus permet d'obtenir des données sur les conséquences d'une catastrophe et l'emprise spatiale du ou des phénomènes impliqués. Ces données peuvent participer par exemple à la construction de référentiels pour comprendre la crise et analyser le relèvement territorial. En effet, la gestion des risques majeurs, et particulièrement les risques naturels, se traduit par un cercle dont les processus sont en rotation perpétuelle (***Leone et al., 2011***). En cela, ces données satellitaires témoignent d'un risque présent sur des territoires exposés à de futurs événements. La phase « *post*-catastrophe » est d'ailleurs présentée comme la dernière étape de cette rotation et dont la fin marque le début d'une nouvelle boucle (***Chance & Noury, 2011; Péroche, 2016***) (cf. supra 2.1.3). Elle doit donc amener à de profondes réflexions afin de perpétuer et améliorer le cycle de la gestion et de la prévention des risques, notamment par la mise en lumière de vulnérabilités qui étaient méconnues. Ces vulnérabilités doivent pouvoir être mobilisées dans des processus d'apprentissage sur des temps plus longs, de la période de relèvement (***Berke et al., 1993***) et même lorsque le retour à la normale est assuré (***Serre et al., 2012***). Cependant, les enquêtes menées sur Saint-Martin à la suite du cyclone Irma en 2017 ont démontré une faible appropriation des données satellitaires *post*-catastrophes par les acteurs institutionnels (***Péroche et al., sous presse***). Pourtant, il parait essentiel d'élargir l'intégration de ces données vers un public plus large, notamment à des fins d'information préventive.

La dévastation de l'île de Saint-Martin par le cyclone Irma en 2017 a donné l'opportunité d'initier cette démarche de retour d'expérience et de transfert des connaissances *post*-catastrophes à travers le projet ANR TIREX[46] (Transfert des apprentIssages et des Retours d'Expériences scientifiques). L'ampleur du cyclone Irma (septembre 2017) a permis de matérialiser sa gravité et ses conséquences, son emprise spatiale et le contexte territorial sur lequel il a eu cours (***Candela et al., sous presse; Cécé et al., 2021; Defossez & Gherardi, 2020; Duvat et al., 2019; Moatty et al., 2019; Rey et al., 2019, 2020***). Une ampleur, particulièrement adaptée à la création d'informations géographiques dédiées à l'apprentissage et dont la production a été l'objet central des retours d'expériences scientifiques du projet à travers des dimensions spatio-temporelles, dynamiques et multi-scalaires. Ce projet a ainsi offert un terrain d'étude sur lequel expérimenter la création de cette information spatiale. Il a eu pour objectif de capitaliser et valoriser les résultats acquis lors des différentes phases de terrain et par l'exploitation des données à disposition comme c'est le cas pour les relevés des dommages fournis par les SEM. L'objectif final était

[46] https://tirex.univ-montp3.fr/

de favoriser le transfert des connaissances acquises à travers des supports durables pour l'ensemble des populations et qui marqueront « dans les mémoires l'empreinte territoriale de la catastrophe » (***Péroche et al., sous presse***).

Le projet ANR TIREX a ainsi abouti à la création de nombreux supports de communication, notamment numériques et valorisés sur le site internet du projet, qui en plus de fournir des données de comparaison avec la prochaine catastrophe, assure la possibilité de reproductibilité des méthodes (***Péroche et al., sous presse***).

Développement d'une cartographie interactive d'un territoire cycloné

Notre recherche fait partie intégrante de la réalisation de l'objectif du projet ANR TIREX. Elle s'est traduite par des processus de traitement et d'analyse de l'information géographique brute récoltée. Bien que la démarche ait été jusqu'à présent appliquée à la cartographie opérationnelle, elle trouve toute sa place dans le transfert des connaissances et dans les retours d'expérience (***Péroche et al., sous presse***). En effet, les résultats obtenus lors des différentes expérimentations de cette thèse ont démontré l'intérêt d'optimiser la lecture thématique pour une plus grande variété d'acteurs. La valorisation des données scientifiques et techniques doit également prendre en compte les capacités propres au vecteur de communication, mais aussi, les modes diffusion et les moyens d'interaction avec son public cible (***Péroche et al., sous presse***). Lorsque ce public s'élargit, comme c'est le cas des supports de communication *post*-catastrophe, cette valorisation doit prendre en compte les caractéristiques de chaque catégorie d'utilisateurs (***Roche et al., 2013***). Afin de faciliter la lecture et la compréhension du message cartographique par un public élargi, les questions ont été de savoir comment diffuser les données, et comment optimiser le support de visualisation afin de permettre à l'utilisateur d'interagir et d'intégrer au mieux la donnée ?

Pour tenter de répondre à ces interrogations, il a été proposé la création d'une cartographie interactive intégrant certains résultats sur l'impact de l'événement et les replaçant dans le contexte dynamique spatial et temporel de l'avant, du pendant et de l'après-catastrophe (issus du projet ANR TIREX). Ces données sont visualisables au moyen d'une interface web qui guide l'utilisateur à toutes les échelles de la carte tout en assurant une continuité de la charte graphique appliquée à l'affichage des dommages. La méthode d'agrégation par semi-régulier de points proportionnels multi-échelle (cf. supra 12.1.2) a été exploitée afin de visualiser les dommages sur la partie française de Saint-Martin à plusieurs seuils de zoom. Tout comme pour les cartes statiques, l'objectif a été de proposer un outil adapté au transfert d'information vers ses utilisateurs finaux. En offrant un moyen de visualiser l'information à travers les échelles, la compréhension de la dynamique de la catastrophe en est ainsi facilitée tout comme sa mémorisation, grâce à un travail sur son optimisation visuelle et informative.

Un démonstrateur web a été réalisé sur la technologie Leaflet[47], une librairie JavaScript open source qui offre une interface cartographique dynamique aux nombreux avantages. Le premier est sa capacité à être interprétable par la plupart des navigateurs web et plateformes mobiles. La carte est donc intégrable à un site web sans contrainte particulière. Le second repose sur sa capacité à être « responsive », c'est-à-dire adaptative aux différentes résolutions de l'interface, prévues à la fois pour les ordinateurs et appareils mobiles. Autre point intéressant, l'outil est peu volumineux et offre un ratio informations affichées/poids de la carte concurrençant toute production cartographique classique. Enfin, cette bibliothèque interopérable propose de nombreuses extensions, développées par une communauté active d'internautes, utiles pour une personnalisation de la carte en fonction des besoins. Ces atouts techniques offrent la capacité de moduler, stabiliser ou transformer l'outil interactif existant. Dans un premier temps les données géographiques sont composées sous SIG depuis le logiciel libre Qgis. Il est alors possible de les traiter et les mettre à jour tout en conservant une charte graphique et les paramètres sémiologiques établis dans le SIG. Par défaut, Leaflet ne propose pas d'options avancées de mise en page des données correspondant à nos besoins. Une fois stylisées sous SIG, les données ont été exportées vers des rasters tuilés *XYZ*. L'intérêt majeur des tuiles est de fluidifier l'affichage des données dans le navigateur en précalculant les images à restituer. Seules les images couvrant l'emprise visualisée sur la carte sont affichées à la résolution du zoom en cours. Cela multiplie donc la capacité de charge de la carte qui peut supporter plusieurs jeux de données actifs simultanés. L'accès à l'outil est assuré par un espace de stockage web qui se charge de diffuser la carte sur internet. Sur le même modèle qu'une page web statique, la carte n'a besoin d'aucun applicatif supplémentaire pour fonctionner.

Ces choix méthodologiques et techniques répondent à plusieurs objectifs. D'une part il s'agit de faciliter la lecture du message cartographique. La cartographie web se place dans un environnement où l'utilisateur (internaute) ignore les principes fondamentaux de la cartographie et de la graphique (***Griffin & Fabrikant, 2012; Mericskay, 2016; Roche et al., 2013***). L'intégration des principes sémiotique de la cartographie traditionnelle à ceux de la cartographie numérique permet de faire la passerelle entre les études fondamentales menées à partir des années 1960 (cf. supra 4.1) et les outils en ligne. Les résultats obtenus de l'expérimentation #2 ont montré l'intérêt du semi-régulier de points proportionnels pour une analyse thématique auprès d'un public varié. En respectant des règles simples de sémiologie graphique, il n'est pas nécessaire de connaitre le langage cartographique pour en interpréter le message final. En plus de la rapidité d'affichage traduite par l'interface numérique, l'expérimentation #3 a démontré que l'utilisateur est appelé à mieux percevoir les informations, et ceci sur des temps plus courts notamment vis-à-vis des techniques comme l'interpolation ou le carroyage pour les tâches d'analyse générale. La conception d'un modèle intuitif et facile à interpréter permet d'optimiser sa familiarité quasi instantanée, durable dans le temps. *In fine*, cette approche permet d'accroitre le potentiel de mémorisation des utilisateurs.

Ce potentiel de mémorisation en sera d'autant plus amélioré par un modèle qui offre une vision synoptique et dont la descente ou la montée d'échelle reste cohérente et fiable. C'est le principal défaut

[47] Leaflet est la principale bibliothèque JavaScript à code source ouvert pour la création de cartes interactives adaptées aux téléphones portables : *https://github.com/Leaflet/Leaflet*

des cartes numériques en ligne conçues par des développeurs informatiques (***Mericskay, 2016***). Ces derniers proposent différents modes de représentation utilisant des méthodes de cluster, de *heatmap*, sans réellement s'interroger sur leur fond. Cela se traduit par des erreurs sémiotiques lorsqu'elles tentent de répondre à la nécessité d'afficher un nombre important d'informations. Dès lors, l'objectif est d'explorer la donnée afin d'en tirer du sens et de s'adapter aux différents modes de visionnages contemporains (***Gaffuri, 2011; Torpelund-Bruin & Lee, 2009; Traun, 2013***). Comme le met en avant Mericskay (***2016***), il faut néanmoins rester vigilant face à ces méthodes qui sont « davantage esthétiques que rigoureuses du point de vue des géotraitements opérés »(***p.8***). Il s'agit donc de fluidifier la navigation par le filtrage des informations à afficher en fonction de l'échelle de visionnage. Cette scénarisation des éléments permet d'intégrer une grande quantité d'informations en fonction d'échelles de visualisation pertinentes. Par ailleurs, la méthode du semi-régulier de points proportionnels permet de transformer les figurés ponctuels largement utilisés (voire prédominants) dans ce type de support (***Singleton & Brunsdon, 2014***), en les agrégeant statistiquement afin de préserver les seuils de lisibilité.

Ce démonstrateur web se concrétise par une cartographie scénarisée et interactive dont les échelles de visionnage retranscrivent l'histoire d'un territoire cycloné (***Péroche et al., sous presse***). Cette carte est disponible au lien suivant : *https://worldismap.com/dommages-irma/*. À l'ouverture de la carte (Figure 143), une série d'informations contextuelles sur l'aléa (le cyclone) s'affichent (phase #1). Les seuils de zoom suivants illustrent l'impact du cyclone à l'échelle régionale et quantifient le coût de la catastrophe en termes de dommages vis-à-vis d'événements survenus depuis 1990 (phase #2). À partir du niveau 6, l'utilisateur est appelé grâce à une signalétique à zoomer sur l'île de Saint-Martin (phase #3) afin de continuer son exploration à une échelle d'analyse plus locale. Dès lors, on entre dans la quatrième phase (phase #4) du visionnage. Celle-ci intègre une analyse multiscalaire des dommages à partir des données Copernicus EMSN-049 (2018). La méthode du semi-régulier de points proportionnels agrège les informations du niveau 12 (1 : 136 495) au niveau 15 (1 :17 062) grâce au processus d'emboîtement des mailles. À partir du niveau 16 (1 : 8 531), les dommages sont affichés à l'échelle du bâti au moyen d'une implantation ponctuelle. À cette échelle ainsi qu'aux échelles supérieures, l'utilisateur peut explorer le territoire de Saint-Martin (partie française). Il interagit avec les différents éléments cliquables pour obtenir des informations sur les niveaux d'endommagement ou encore sur les secteurs d'étude du projet TIREX. Le fond de carte est travaillé à partir d'une image aérienne de l'IGN (2017) sur laquelle sont appliqués un filtre noir et blanc et une diminution des contrastes. Des courbes de niveau sont également présentes pour apprécier la topographie du terrain. Ce choix permet d'assurer d'une part la continuité des fonds de carte que l'on retrouve aux échelles plus petites et d'autre part d'amener l'imagerie aérienne, ou satellite en fonction des possibilités, à des échelles de visualisation plus pertinente *c.-à-d.* des échelles suffisamment fines pour permettre d'apprécier les informations fournies par l'image et pour limiter les effets surcharges visuels.

En plus d'une dimension visuelle, ce démonstrateur web exploite également une dimension sonore afin d'immerger l'utilisateur au cœur de son expérience cartographique.

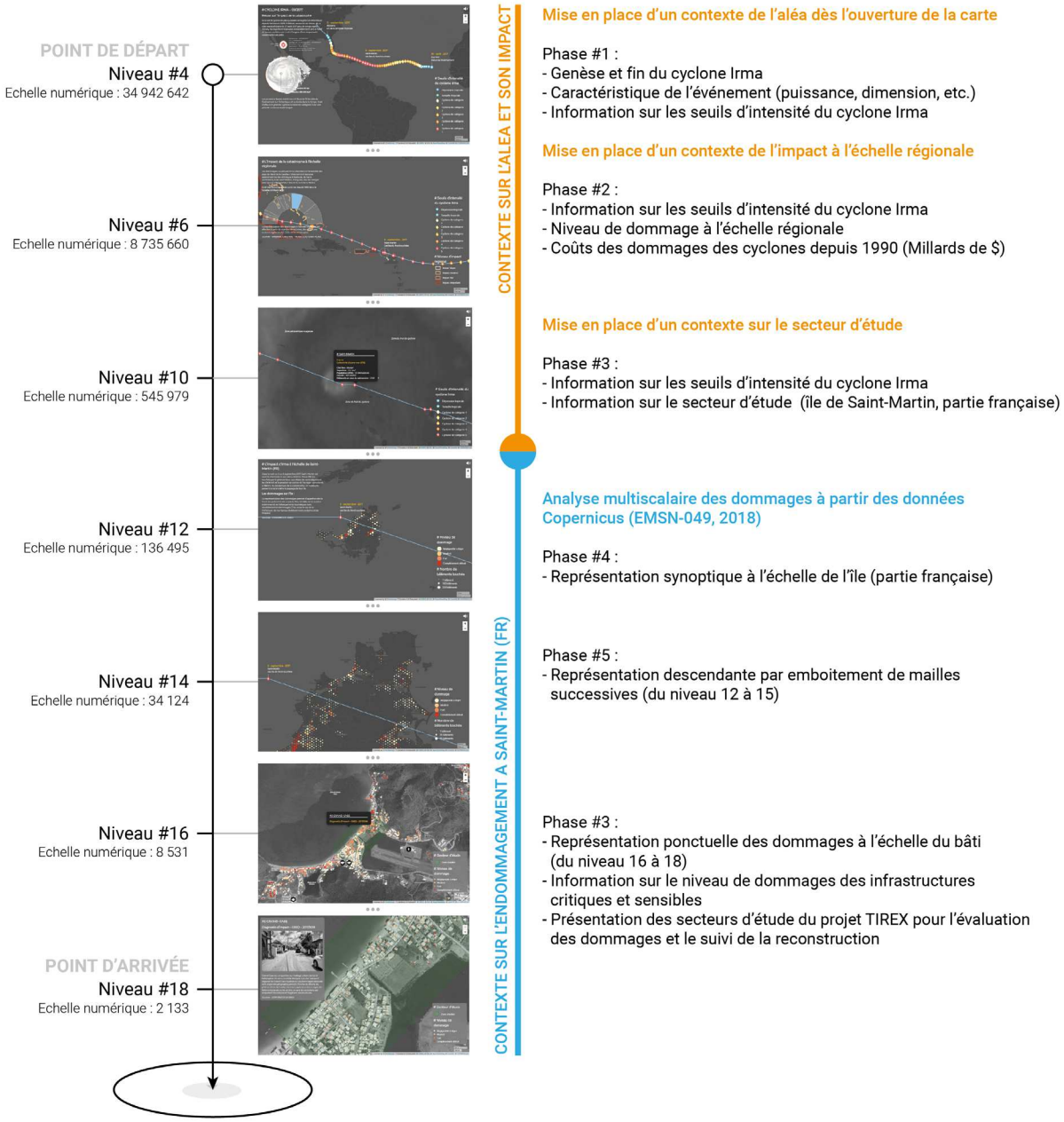


Figure 143 : Niveaux d'affichage cartographique de l'aléa et des conséquences du cyclone Irma (2017), de la Caraïbe à Saint-Martin

Cartographie synesthésique : l'image et le son

Comme nous avons pu le mettre en exergue à de nombreuses reprises, la cartographie traditionnelle est fondamentalement visuelle. Cependant, tout au long de son expérience cartographique, l'utilisateur déploie deux sens : la vision, principale vecteur d'acquisition de l'information, mais également l'ouïe. Cette intégration du son dans les cartes n'est pas récente.

Bien souvent la cartographie sonore est assimilée à une représentation qui se limite aux données quantifiables et mesurables. Il s'agit alors de cartes de bruits ou de nuisances sonores. Cependant, Chételat (***2009***) met en avant la possibilité d'enrichir l'interprétation de l'information géographique par

l'intégration du son. Si ce dernier est rarement exploité à des fins de représentation de l'espace, il a pourtant un important pouvoir d'évocation. Bailly et Scariati (***1999***) soulignent d'ailleurs le rapport qu'une personne peut avoir avec son environnement et dans lequel elle va mobiliser tous ces sens. Le souvenir d'un paysage est assimilé à des images, des odeurs, des goûts et des sons. Ces sens s'inscrivent dans une mémoire sensorielle individuelle et collective. Dans le cas d'un cyclone, cette perception auditive est particulièrement décuplée. Les sons de la catastrophe imprègnent la mémoire des habitants autant que l'image des destructions qu'elle cause. À l'instar des sons environnants du quotidien (***Théberge, 2005***), ils font figure de marqueurs forts des territoires exposés et des conditions qui les ont fait apparaitre. Le son des vents puissants, de la pluie, des toitures qui s'arrachent, etc. sont autant d'éléments sonores qui sont ancrés dans la mémoire collective de la catastrophe. Cependant, ils diffèrent de la représentation spatiale des dommages dont la compréhension fait appel à une interprétation cartographique et géographique qui est dépendante du niveau de formation de l'utilisateur. Ainsi, les variables sonores sont parfaites pour compléter l'application de variables visuelles correctes dans la construction et le transfert d'informations thématiques. Cette démarche s'inscrit dans l'association neurologique de deux sens pour une même expérience. Elle est autrement appelée synesthésie (***Abdelbery et al., 2014; Simner et al., 2006***).

Si la carte classique, sur papier, ne permet pas d'intégrer ces variables sonores, les cartes numériques interactives offrent la possibilité d'exploiter l'ensemble des contenus multimédias et proposent d'ailleurs de nombreux moyens de les représenter. Cependant, le terme de représentation n'est pas adéquat dans notre cas de figure. Lorsqu'un son est représenté, il est soumis par défaut aux contraintes du langage cartographique (***Chételat, 2009***) et c'est bien pour cela qu'il s'agit de variables sonores et non de représentation. La richesse sémantique de cette dimension sonore (volume, fréquence, durée, relâchement, répétition, etc.) est encore peu mobilisée dans ce type de support cartographique (***Abdelbery et al., 2014; Chételat, 2009***).

De manière générale, l'intégration de ces variables prend deux dimensions. La première est affiliée à l'ambiance sonore et la seconde à une typologie sonore. Dans notre cas nous avons exploité la structure narrative de ces deux dimensions afin d'accompagner d'une part la descente d'échelle lors du visionnage de la carte, mais également la temporalité de la catastrophe. L'ambiance sonore se définit par les sons qui accompagnent la lecture de la carte. Au fur et à mesure que l'utilisateur explore la carte en zoomant progressivement sur l'île de Saint-Martin, le son change, évolue et est amplifié ou atténué grâce à des fondus enchaînés qui sont travaillés en préproduction. Les sons ont été produits à partir de bases de données libres de droits disponibles sur internet ou bien directement collectés lors des phases de terrain et des enquêtes auprès de la population. La capture de son a été réalisée à partir d'enregistreur audio indépendant ou de microphones pour appareil photo. Une fois l'échantillon construit il a fait l'objet d'un mixage à l'aide de logiciels dédiés (adobe audition, adobe première pro, etc.). Ces sons ambiants favorisent l'immersion de l'utilisateur et l'interprétation de réalité qui peuvent être déconnectés de l'aspect graphique. L'espace sonore s'adapte aux données et reste spatialement et temporellement cohérent afin de ne pas surcharger les sens. Ces interactions sonores peuvent d'ailleurs être annulées à tout moment grâce à un bouton situé sur l'interface. En dehors des sons ambiants, l'utilisateur est également amené à interagir avec les éléments géoréférencés.

Ainsi, sur la plateforme en ligne, les dommages au bâti ou encore les points d'intérêts sont conçus comme des éléments cliquables dont l'information visuelle est accompagnée d'une information sonore. Ils forment une banque de sons dont la typologie caractérise d'une part l'intensité des dommages et d'autre part les différentes structures critiques qui composent le territoire de Saint-Martin (partie française). Concernant les dommages, le son est construit à partir de plusieurs éléments qui simulent le bruit des bris de verre, la force des vents et le craquement des structures en bois. Plus les dommages sont élevés et plus le son est fort, long et plus il intègre d'éléments évocateurs d'un endommagement important de la structure. Ainsi, le son joue un rôle de déclencheur de la mémoire, d'un souvenir, à l'instar du phénomène de la madeleine de Proust. Bien évidemment, cette production sonore peut être améliorée afin de se rapprocher encore plus de la réalité, mais elle offre cependant un aperçu des possibilités d'intégration du son en tant que variable à part entière.

En conclusion, le démonstrateur web cartographique reposant sur l'exemple du cyclone Irma montre qu'il est possible de scénariser du contenu (vecteurs, image, son, vidéo) à certains seuils de zoom ou encore lors de l'interaction avec un élément cliquable. L'objectif d'un tel procédé est de limiter les appels d'hyperliens que l'on retrouve traditionnellement dans ce type de support et de pérenniser l'immersion de l'utilisateur. En plus de participer à la diffusion des connaissances issues du projet TIREX, cette carte interactive a fourni un premier démonstrateur fonctionnel de notre méthode d'exploitation des données satellitaires alors même que ces dernières sont encore principalement diffusées sous la forme de carte numérique statique et de données géospatiales (cf. supra 3.1). Ce démonstrateur est réalisé ici sur les dommages peut être transposé à d'autres cas comme le suivi de la reconstruction (cf. supra 12.1.3). Bien évidemment, cette réalisation sert des objectifs de sensibilisation et d'information préventive sur le temps long, mais il peut être appliqué et optimisé à la création d'outils de cartographies numériques utiles à la gestion des risques et lors de situation de crise. Pour cela, nous proposons une méthode de traitement et d'exploitation multi-échelle de données géographiques fondée sur une architecture logicielle libre.

12.2.2. Création d'une méthode semi-automatique d'exploitation multi-échelle des dommages à partir d'une architecture logicielle libre

À partir de la méthode développée pour la réalisation du semi-régulier de points proportionnels et son adaptation au changement d'échelles (cf. supra 12.1), nous avons réalisé un outil de traitement semi-automatique de la donnée à destination des opérationnels et des décideurs institutionnels et des SEM pouvant être intégré sur leurs plateformes SIG. Quel que soit le territoire concerné, sa taille, et sa localisation, l'utilisateur doit pouvoir générer un ou plusieurs niveaux de mailles parfaitement emboités selon une emprise prédéterminée, facilement rééditable et transposable sur n'importe quel système d'exploitation. Cela peut être par exemple des limites administratives ou naturelles comme les contours d'une île, d'un bassin versant, etc. ou encore des limites créées par les utilisateurs selon des besoins spécifiques.

Une architecture ouverte autour du triptyque PostGreSQL/PostGis/Qgis

Cet outil a été réalisé sous PostGreSQL. Il s'agit d'un système de gestion de base de données relationnelle et objet (SGBDRO) développé en 1996, dont la dernière version date du 12 novembre 2020. Ce choix s'est porté naturellement vers ce système, car il s'agit de la source ouverte la plus avancée dans le monde qui supporte la grande majorité des requêtes SQL et de contrôle simultané. Il offre des fonctionnalités modernes comme les requêtes complexes, les vues, les déclencheurs et permet d'ajouter de nombreuses extensions de types de données, fonctions et langages procéduraux (***Piotrowski, 2018; Wieczorek & Briand, 2001***). Il est utilisé avec son extension PostGIS qui respecte les normes de l'Open Geospatial Consortium (OGC) dans le cadre de la recommandation Simple *Features Specification for SQL* (SFS). PostGreSQL a également pour avantage d'être facilement interfaçable avec d'autres outils d'administration de bases de données comme PGAdmin3 et le gestionnaire de base de données intégré à QGIS.

L'intérêt de l'extension PostGIS est de pouvoir manipuler des informations géographiques sous la forme de géométries vectorielles (points, lignes et polygones) : POINT, LINESTRING, POLYGON, MULTIPOINT, MULTILINESTRING, MULTIPOLYGON, GEOMETRYCOLLECTION. Ces géométries peuvent être définies en 2 dimensions (x,y) ou 3 dimensions (x,y,z) et se composent également d'informations sur les coordonnées et les dimensions ainsi qu'un système de référence spatiale contenu dans des colonnes dédiées. À partir de ces géométries, PostGis fournit des fonctions de calcul géométrique et spatial directement utilisables dans les requêtes. Il permet par exemple de déterminer les périmètres, les distances entre deux objets, d'opérer des intersections et des fusions, etc. Enfin, il rend possible son utilisation par les SIG, notamment dans le traitement et le stockage d'objet graphique. Par ailleurs, il permet d'analyser et d'explorer les données via des serveurs web SIG.

Les performances et la nature open source de ces deux systèmes (PostGreSQL/PostGis), associées à la prise en charge de nombreux langages de programmation et l'intégration de nouvelles fonctionnalités, ont largement contribué à leur utilisation en tant que base de données spatiale pour une variété d'applications d'analyse géospatiale et de cartographies Web ***(Chen & Xie, 2008; Feick & Robertson, 2015***). De fait et bien souvent à l'inverse des logiciels commerciaux, l'architecture ouverte et la gratuité de ces deux logiciels offrent une mise en œuvre rapide de presque toutes les nouvelles fonctionnalités rajoutées au cours des mises à jour (***Bastin et al., 2013***). En outre, ces deux systèmes sont plus facilement intégrables à tout produit commercial tiers (***Shaparev & Yakubailik, 2016***).

QGIS complète le triptyque open source en s'interfaçant directement avec les données stockées dans le SGBDRO (PostGreSQL/PostGis). Pour cela, il est utilisé avec son plug-in DB manager. Ce gestionnaire de base de données permet d'exécuter des requêtes sur les données géographiques et attributaires et de visualiser directement les résultats sur son interface graphique.

Ce triptyque sous-entend l'installation des trois applicatifs sur la machine hôte afin de faire fonctionner l'environnement de calcul. Comme évoqué précédemment, l'interopérabilité de la suite logicielle open source que nous employons est conçue pour être configurable et adaptable à tout type d'environnement technique. Un axe de développement de l'outil a été mené afin d'assurer la simplicité et la facilité de déploiement du calculateur sur différents supports. Ainsi, l'application a été développée dans un environnement containerisé. Il s'agit d'isoler les processus qui font fonctionner l'application dans des

espaces dédiés et indépendants du reste de la machine hôte (Figure 144). Une fois configurés, les containers peuvent communiquer entre eux et échanger les ressources dont ils ont besoin pour faire fonctionner le calculateur. Le logiciel Docker[48] a été sélectionné pour organiser l'environnement containerisé. Une série d'images (fichiers statiques contenant des codes d'exécution d'un programme) permet de recréer une installation complète de chaque programme et de lancer les processus en arrière-plan. Les logiciels isolés font appel à la mémoire physique et dynamique de la machine hôte sans pour autant y être installés « en dur ». La mise en place de ce système est appelée « machine virtuelle » (***Ancelin et al., 2016***). L'intérêt de cette approche est de pouvoir déployer rapidement l'ensemble des logiciels utiles sans que l'utilisateur paramètre son environnement de travail. Elle assure également le caractère open source et la reproductibilité de la recherche (***Quinton et al., 2018***). Un autre intérêt est que Docker peut être mobilisé dans les phases de développement de l'outil et de production, une fois que le calculateur est hébergé sur un serveur ou dans un cloud.

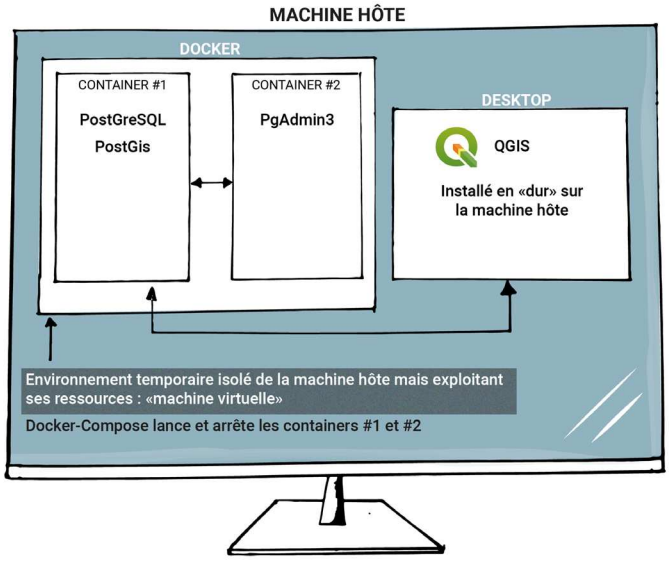


Figure 144 : Déploiement d'une machine virtuelle pour le fonctionnement du triptyque open source

L'ensemble des containers est administré par un utilitaire associé à Docker, Docker-compose. Ce gestionnaire administrateur de containers peut être exécuté en ligne de commande. Il permet de déployer toute l'infrastructure en une seule ligne de commande sur la machine hôte.

Procédure de création des différents niveaux de mailles sous PostgreSQL et son extension PostGIS

Une fois l'environnement de calcul déployé sur la machine hôte, une série de protocoles SQL est dédiée à la création des niveaux de mailles qui intéressent l'utilisateur. La stratégie de calcul a été répartie en grandes étapes dissociées de manière à segmenter les différentes tâches de calcul. Cela permet d'exécuter une portion du calcul en fonction des besoins de l'utilisateur. Ce travail a été réalisé avec une version antérieure à la dernière version de PostGIS (version 3.0). Cette version moins récente ne permet pas

[48] Docker est un logiciel qui permet de faire fonctionner un serveur à l'intérieur d'un autre serveur, quel que soit le système d'exploitation sous-jacent, et en automatisant notamment les installations. Cf. *https://www.docker.com/*

d'intégrer au code des fonctions de génération de grilles hexagonales disponibles uniquement dans les dernières versions. *ST_HexagonGRID* par exemple, n'est valable qu'à partir de la version 3.1. Néanmoins, ce choix garantit l'exécution du code dans différentes versions de PostGIS et une meilleure construction du calcul répondant à nos besoins. Il s'inspire de différents travaux accessibles en open source[49]. Le code reprend certaines fonctionnalités de ces derniers afin de les adapter à nos besoins.

Procédure :

- **Étape 1 – sélection de la zone d'étude**

La première étape consiste à alimenter l'environnement de calcul par une entité géographique géoréférencée à partir de laquelle les mailles seront générées. Les contours administratifs d'une commune par exemple sont intégrés à la base de données PostGIS à partir d'une ou plusieurs couches vectorielles via le DB manager de QGIS.

- **Étape 2 – définition des emprises de calcul par niveau**

Une fois la première géométrie créée, l'étape suivante définit l'étendue du futur carroyage dans le système de coordonnées de travail. Ce dernier est fixé selon les sommets (*x1, y1* ; *x2, y2*) de l'emprise d'une *Bounding Box* (Bbox), qui englobe l'entité géographique de référence. Ensuite, l'algorithme se charge de générer des emprises déformées selon le niveau de zoom indiqué dans la table de référence (0 à 18) (Tableau 18). Ce travail permet d'adapter au mieux l'emprise sur laquelle seront générés les différents niveaux de maille. L'ensemble des résultats est stocké dans une table de sauvegarde pour les prochaines étapes.

- **Étape 3 – définition d'une fonction de calcul des mailles**

Cette étape consiste à déclarer le contenu dynamique, *c.-à-d.* tout ce qui est utilisé dans la génération de notre carroyage. Les aires, les hauteurs et largeurs de la maille, etc. sont définies dans une base de données à partir de la table de référence utilisée précédemment (Tableau 18). Il est nécessaire de spécifier le format numérique et les coordonnées *x* et *y* des différents niveaux de Bbox et leur niveau de précision. À partir de ces informations, le protocole se charge de calculer les mailles pour chaque niveau de zoom selon une fonction SQL qui permet d'intégrer au processus ces différentes données contenues dans la base de données.

La fonction génère des mailles hexagonales, selon une étendue spatiale comprise entre deux points. Elle intègre un système de coordonnées de référence (EPSG 3857) permettant le géoréférencement des résultats de la fonction. La fonction récupère une information de surface correspondant à l'aire que doit faire le polygone en sortie. À partir de cette aire, le code calcule la longueur d'un côté de l'hexagone :

$$Longueur\ d'un\ côté\ (LChex) : \frac{\sqrt{\boldsymbol{aire} \div (\sqrt{\mathbf{3}} \times (\mathbf{3} \div \mathbf{2}))}}{\mathbf{2}}$$

Et son apothème, correspondant à la moitié de la hauteur de l'hexagone :

$$LChex \times \sqrt{\mathbf{3}}$$

Ces informations sont ensuite utilisées pour construire la géométrie hexagonale. À ce stade, l'hexagone est encore conceptuel et doit être défini en tant que géométrie. Sur la base des valeurs de côté et de l'apothème, la fonction

[49] Saalmans (2015) : *https://github.com/minus34/postgis-scripts/blob/master/hex-grid/create-hex-grid-function.sql*
Bauszus (2017) : *https://medium.com/geolytix/hex-grid-algorithm-for-postgis-4ac45f61d093*

définit une première géométrie composée de sept sommets, référencés sur un axe *x* et *y* et reliés par des lignes. Elle duplique ensuite un second hexagone à droite au-dessus du premier. Le lot de géométrie est géoréférencé dans la projection de travail.

À partir de là, la fonction generate_series de PostGreSQL génère des mailles par lots de deux sur l'étendue de la Bbox en partant d'un point d'ancrage situé en bas à gauche de l'étendue. Ce dernier (*y1)* est augmenté par l'addition de la moitié de la hauteur de l'hexagone permettant ainsi de gérer l'emboitement des différents niveaux de mailles. Tant que la limite en *xmax* et *ymax* (*x2, y2* : coin supérieur haut droit) de la Bbox n'est pas atteinte, la fonction génère des hexagones en partant du *xmin* et *ymin* (coin bas gauche) de la Bbox tout en respectant un intervalle défini. L'incrémentation passe d'une colonne à la suivante et se fait par boucle imbriquée. L'ensemble des résultats est ensuite stocké dans une table.

- **Étape 4 – construction des géométries par niveau de zoom**

La suite du calcul se charge d'exécuter la fonction décrite précédemment selon les données comprises dans la table des Bbox générées à l'étape 1. Les valeurs de cette dernière viennent alimenter la fonction qui est exécutée tant que des données sont disponibles dans la table des Bbox. Cette étape du calcul a pour effet de générer les niveaux de mailles pour chaque zoom.

Une option est intégrée à cette étape du calcul permettant à l'utilisateur de choisir les niveaux sur lesquels générer les mailles. L'utilisateur peut définir un intervalle de zoom, de 10 à 16 par exemple, afin que le modèle génère, par une boucle de fonctions, les différents niveaux de carroyage souhaités. Six niveaux ont été créés grâce à la fonction suivante :

```
_min_level_to_grid INTEGER := 10;
_max_level_to_grid INTEGER := 16;
```

L'utilisateur peut également choisir un seul niveau de carroyage en déclarant deux fois le niveau souhaité. Dans notre cas, l'utilisateur ne peut générer ces niveaux que dans la limite des seuils minimal (0) et maximal (18) tolérés et disponibles dans la table des niveaux de Bbox créées préalablement.

Par la suite, une fonction intersecte les mailles des différents niveaux à la géométrie initiale de notre zone prédéfinie.

En sortie, une table contenant l'ensemble des géométries calculées est disponible. À ce stade, l'utilisateur peut récupérer son référentiel géoréférencé et d'ores et déjà réexploiter le jeu de données dans QGIS en passant par le DB manager. L'ensemble des informations attributaires liées à chaque géométrie est intégré à la table finale afin d'être réexploité dans de prochains traitements. Il peut s'agir du niveau de zoom pour lequel afficher l'entité par exemple.

- **Étape 5 : discrétisation des données**

À partir de cette base, il devient possible d'agréger n'importe quel type de données ponctuelles à nos différents niveaux de mailles. La suite du calcul propose une discrétisation fondée sur l'indicateur de fréquence développé lors de la phase de développement du semi-régulier de points (cf. supra 0). Le résumé statistique doit respecter certaines règles d'utilisation concernant la table de points (Tableau 19). Celle-ci doit contenir deux champs obligatoires : l'information sur le type de données (*info_type*) et une valeur alphanumérique attribuée à la classe de l'entité (*s_val_text*). Trois champs optionnels permettent d'ordonner les classes selon un degré d'importance (*s_val_num*), d'attribuer des groupes de classes (*e_grp_text*) et pour finir d'ordonner ces groupes de classes selon un degré d'importance (*s_grp_num*).

Tableau 19 : Configuration de la table de points pour la discrétisation des données

Champs obligatoires		Champs optionnels		
Info_type	***s_val_text***	***s_val_num***	***e_grp_text***	***s_grp_num***
Évaluation des dommages	*Négligeable à léger*	*1*	*Léger à modéré*	*1*
Évaluation des dommages	*Modéré*	*2*	*Léger à modéré*	*1*
Évaluation des dommages	*Sévère*	*3*	*Sévère à détruit*	*2*
Évaluation des dommages	*Détruit*	*4*	*Sévère à détruit*	*2*

Ainsi l'utilisateur peut choisir de discrétiser ses données selon des règles de fréquences classiques (majorité d'une classe dans chaque maille) ou bien d'affiner son calcul en regroupant les classes, permettant ainsi de diminuer le nombre de variables multimodales au sein des niveaux de mailles. Les classements par ordre d'importance permettent d'une part de privilégier certaines classes lorsque les variables sont bimodales, et d'autre part de classer l'ordre d'apparition des classes lorsqu'aucune tendance ne se dégage. Ce cas se présente par exemple lorsque deux variables d'un même groupe sont équivalentes, ou bien quand les ratios sont équivalents pour l'ensemble des classes.

Cette méthode a pour principal avantage d'élargir le spectre des informations pouvant être représentées. L'utilisateur peut ainsi représenter des variables qualitatives non ordonnées, ordonnées, et les regrouper selon des caractéristiques, catégories spécifiques (type d'occupation du sol, évaluation des risques, catégorie d'espèces, classe socio-économique, etc.)

Les résultats en sortie de calcul sont configurés de telles sortes que la table attributaire de la couche de mailles multi-niveaux contienne pour chaque maille (Tableau 20) : l'information sur le type de données (*info_type*), la classe la plus fréquente (*frequence*), le nombre d'occurrences de cette classe (*occ_freq*), la tendance reposant sur les regroupements définis par l'utilisateur (*tendance*), l'indicateur de fréquence améliorée (*best_freq*), le nombre d'entités décompté dans la maille (val_count), le pourcentage que représente la/les classes les plus fréquentes (*pourc_freq*), le niveau auquel la maille est rattachée (hex_level), son échelle de visualisation (hex_scale), et sa surface exprimée en m² (hex_area_m). Deux autres champs (*Info_freq* et *Info_tend*) font une synthèse des résultats issus de la fréquence et des tendances en proposant un commentaire automatisé à partir d'un ensemble de requêtes.

Tableau 20 : Table attributaire en sortie d'algorithme

Info_type	***frequence***	***occ_freq***	***tendance***	***best_freq***	***Val_count***	***Pourc_fre***
Évaluation des dommages	*Modéré*	*18*	*Léger à modéré*	*Modéré*	*30*	*60*
Évaluation des dommages	*Modéré*	*4*	*Léger à modéré*	*Modéré*	*4*	*100*
Évaluation des dommages	*Détruit*	*10*	*Sévère à détruit*	*Détruit*	*15*	*67*
Évaluation des dommages	*Négligeable à léger, Sévère*	*40*	*Sévère à détruit*	*Sévère*	*110*	*50*

hex_level	***hex_scale***	***hex_area_m***	***Info_freq***	***Info_tend***
9	*1091958*	*19953225*	*La classe "modérée" est la plus représentée dans cette maille à hauteur de 60% des entités*	*Cette maille contient une majorité de dommages légers à modérés*
12	*136495*	*311769*	*….*	*….*
11	*272989*	*1247076*	*….*	*….*
14	*17062*	*19485*	*…..*	*….*

Mise en place d'une cartographie web

À partir des données contenues dans la couche de mailles multi-niveaux, agrégeant les données de la table de points d'origine aux différents niveaux prédéfinis par l'utilisateur, il est possible de représenter cartographiquement des informations qualitatives (ordonnées ou non) ou quantitatives, ou bien les deux à la fois. Ces informations pourront être visualisées à partir du carroyage multi-niveau créé par défaut en sortie d'algorithme, directement exploitable sous SIG ou WebSIG, ou bien de créer un semi-régulier de points à partir des SIG, intégrable dans une interface web. Comme pour la section précédente, nous proposons une procédure en plusieurs étapes.

Procédure :

- **Étape 1 : création du semi-régulier de points proportionnels sous SIG**

À partir des données carroyées en sortie, nous avons appliqué les méthodes de représentation développées précédemment en section 7.2.1 et 12.1.2 afin d'obtenir une représentation par semi-régulier de points proportionnels s'adaptant à chaque niveau de mailles prédéfini. Bien que cette partie demande une phase de traitement et de stylisation manuelle de la part du cartographe, il est possible de fluidifier ces opérations en créant des styles prédéfinis en fonction des thèmes abordés et des paramètres de tailles des mailles définis précédemment (Tableau 18).

- **Étape 2 : Mise en place d'un protocole de communication entre les SIG et une interface web.**

Cette étape a consisté à créer un protocole de communication entre les données représentées sous SIG et une cartographie web dédiée. À ce stade, nous sommes allés plus loin que la cartographie web présentée précédemment (cf. supra 12.2.1) et pour laquelle les données cartographiées étaient directement intégrées sous la forme de tuile raster XYZ. Ici, l'objectif a été d'augmenter la capacité d'interaction avec les données en interrogeant un serveur de données géographiques[50] fournissant des rasters tuilés au format Web Map Service (WMS) et Web Feature Service (WFS). Ces formats sont des Web Services générant des flux géographiques standardisés décrits par l'OGC (***Souissi & Mainguenaud, 2013***). Le service WMS comprend trois principales opérations (*GetMap, GetCapabilities* et *GetFeatureInfo*) qui permettent l'affichage de cartes à partir de serveurs géographiques tandis que le service WFS permet, au moyen de plusieurs opérations (*GetCapabilities*, *DescribeFeatureTyp*e, *GetFeature*, *Transaction* et *LockFeature*) et d'une URL formatée, d'interroger ces serveurs afin de manipuler des couches vectorielles (lignes, points, polygones, etc.).

Pour satisfaire cet objectif, nous avons paramétré un environnement Qgis serveur à partir de l'interface graphique du logiciel Qgis installé « en dur » sur l'ordinateur. Ce choix, bien qu'implicite à notre usage de Qgis dans notre recherche, est conforté par la complète adaptation de ce serveur à la communication et à la publication de cartes sur internet (***Ancelin et al., 2016***). Outre sa facilité d'administration et de paramétrage, cet environnement permet la diffusion de protocoles géographiques standardisés OGC et encourage ainsi l'interopérabilité des données traitées.

En tout premier lieu, les conditions d'affichage des couches vectorielles comme leur symbologie, leurs échelles cartographiques de visualisation, etc. ont été paramétrées depuis l'environnement Qgis serveur.

[50] Un serveur de données géographiques est un serveur informatique permettant aux utilisateurs de partager et de modifier des données géographiques. Il est conçu pour être interopérable entre les sources principales de données spatiales.

Ce dernier a ensuite été utilisé afin de créer des flux WMS et WFS standardisés servant à diffuser les couches vectorielles contenues depuis le projet QGIS vers l'interface web.

À partir de là, nous avons fait appel à plusieurs requêtes permettant d'assurer l'affichage des données (*GetMap*), la possibilité d'interroger leur table attributaire (*GetFeature*) et d'imprimer une carte (*GetPrint*) depuis l'interface web :

- Les requêtes *GetMap* interrogent les flux WMS fournis par le serveur géographique et apportent un affichage des données à la demande depuis le navigateur web. Les données sont ainsi visualisées selon les conditions d'affichage prédéfinies dans le projet Qgis. Elles sont affichées sur l'interface web selon l'emprise d'une *bounding box* dédiée à la carte et selon les seuils de zoom web Mercator définis précédemment (Tableau 18).
- Les requêtes *GetFeature* interrogent à la demande les données attributaires des couches diffusées par les flux WFS. Ces flux, au format vectoriel, permettent par exemple la création de graphiques statistiques dynamiques dans la page web à partir des données attributaires affichées dans la *bounding box*. Ils peuvent être utilisés afin de fournir des compléments d'information sur les données affichées et selon des emprises administratives par exemple.
- Les requêtes *GetPrint* disponibles pour les flux WMS permettent la mise en page des cartes lorsque des options d'impressions sont disponibles sur l'interface web. Ces requêtes s'adressent ainsi au serveur SIG afin de construire un fichier PDF de la carte affichée à l'écran en considérant les paramètres de mise en page définis depuis le projet Qgis. Cette requête se montre particulièrement intéressante dans la génération de cartes statiques dont la représentation des données est configurée selon des échelles de zoom par exemple.

L'ensemble de ces requêtes permet de configurer la représentation des informations à travers un démonstrateur web.

Proposition d'un démonstrateur web de plateforme cartographique dynamique et interactive

L'ensemble de ces procédures et protocoles ont abouti à la construction d'un second démonstrateur web cartographique utilisé dans le cadre des solutions dispensées par le bureau d'études RisCrises (Figure 145). Cette plateforme cartographique, au stade expérimental, allie une représentation cartographique et des données statistiques sur le risque incendie de près de 600 000 bâtiments dans le département du Gard dont le traitement sous PostGreSQL/PostGis a été réalisé en une trentaine de minutes seulement. La carte (à gauche de l'écran) et les données statistiques (à droite de l'écran) s'adaptent en fonction des seuils de zoom et donnent une visualisation du risque allant de l'échelle départementale à l'échelle du bâtiment. Nous avons réalisé cet indicateur de risque incendie à partir de la réglementation en vigueur dans le cadre de la Défense Extérieure Contre l'Incendie (DECI) qui admet 4 niveaux de risque : le risque courant, le risque ordinaire, le risque important et le risque particulier. Ces niveaux ont été construits à partir de plusieurs facteurs comme le type de structures, la morphologie urbaine, le type d'activité, la proximité à un massif forestier, le niveau d'accessibilité, la disponibilité d'un point d'eau, etc. Les résultats obtenus par cette méthode ont été validés au moyen de relevés de terrain sur plusieurs sites pilotes tels que Manosque et Alès, mais aussi par une validation auprès des acteurs institutionnels et des services de pompiers implantés sur ces territoires.

Ainsi, la carte permet de visualiser un indicateur de risque incendie aux petites échelles à partir des données qui ont été agrégées aux différents niveaux de mailles créés par les procédures de calcul PostGreSQL. À ces échelles, l'information est représentée par un semi-régulier de points proportionnels

dont la variation de couleurs indique le niveau de risque tandis que la variation de taille fournit la quantité de bâtiments concernés. Aux grandes échelles, les bâtiments sont représentés par une implantation ponctuelle dont la couleur varie en fonction du niveau de risque.

Cette représentation cartographique est complétée par une zone contextuelle dynamique proposant un contenu statistique additionnel qui varie en fonction des échelles de zoom et de l'emprise de la *bounding box*. Cette première version présente pour l'instant le nombre de bâtiments compris dans l'affichage de la *bounding box* et apporte une indication sur leur répartition typologique. À terme, l'utilisateur pourra choisir d'afficher ce type de données en fonction d'une ou plusieurs limites administratives par exemple. Enfin, l'utilisateur peut imprimer sa propre carte au format .PDF en quelques clics et télécharger le document qui a été préalablement mis en page.



Figure 145 : Première version du démonstrateur web cartographique dynamique et interactive appliquée au cadre de la DECI

Cette phase de la thèse s'est consacrée à proposer des améliorations de l'outillage opérationnel en situation de crise et plus largement à la gestion des risques en proposant un second démonstrateur utilisable par les nombreux acteurs de ce domaine. Il a notamment démontré qu'il était possible d'agréger, sur des temps relativement courts, une quantité importante de données thématiques à différents niveaux d'échelles de visualisation en se fondant sur les échelles de diffusion web Mercator. Les protocoles développés sous PostGreSQL et PostGIS s'adaptent facilement aux contextes territoriaux

et assurent une stabilité spatio-temporelle des analyses en fixant la structure de la maille à l'emprise des entités de références : limites administratives, aires d'intérêts, etc. Facilement intégrables aux interfaces de WebSIG, ces protocoles permettent d'accéder aux données via un portail de géovisualisation dédié et accessible depuis un navigateur internet. L'administration des données est réalisée sous SIG et PGAdmin3. Elle permet par exemple d'intégrer le suivi et la mise à jour des évaluations de dommages au moyen de chaînes de traitement automatisées et de flux WMS et WFS. Ce faisant, cet outil a été pensé afin d'être en capacité technique de proposer une solution de cartographie web utilisable par les SEM tout en répondant aux objectifs du bureau d'études RisCrises. Il permet également l'intégration d'autres indicateurs spatiaux comme les densités de population, le type d'occupation du sol, d'aléa, etc. utile au développement d'outil d'analyse spatiale dans le domaine de la gestion des risques majeurs.

12.3. L'information et la communication de l'incertitude pour les situations d'urgence

12.3.1. Le cheminement de l'incertitude dans la cartographie post-catastrophes

Tout au long de cette thèse, la question de l'incertitude a été abordée à de nombreuses reprises. Toutefois, elle n'a clairement pas été explicitée. Cette sous-section se penche donc sur cette notion et sa place dans la cartographie des dommages *post*-catastrophes.

Qu'est-ce que l'incertitude ?

Afin de mieux comprendre cette notion, il est bon d'en donner une définition. Cependant, cette volonté se confronte rapidement à un champ d'intervention très large qui intègre de nombreuses disciplines (***Brodlie et al., 2012***). Zadeh (***1965***) développe une théorie selon laquelle la réalité ne peut pas être définie uniquement par des variables binaires (0 ou 1, vrai ou faux), mais doit être envisagée comme un ensemble de variables comprises entre 0 et 1, de telle sorte que les réalités sont plus ou moins vraies et plus ou moins fausses (***Traore et al., 2004***). Cette théorie des ensembles flous (***Dutozia et al., 2014; Rolland-May, 1987***) suscite un intérêt particulier chez les géographes. Ces derniers s'intéressent à la notion d'espaces « flous », imprécis qui caractérise la nature même de l'espace géographique. Utilisée essentiellement depuis un peu plus d'une vingtaine d'années en géographie, cette théorie permet de formaliser des réalités et des connaissances incertaines ou floues et de les modéliser sous la forme d'informations géographiques (***Dutozia et al., 2014***). Ces espaces « flous » sont déterminés par des notions d'imprécisions et des mesures quantitatives et/ou qualitatives. Ils peuvent être mesurés selon des paramètres prédéfinis comme la convergence et la divergence des données multi-sources, la fiabilité (origine de la source) et la précision des données (échelle de résolution : bâti, quartier, commune, etc.).

De manière plus générale, l'incertitude peut être définie comme le manque de connaissances sur le nombre d'erreurs causant ainsi l'hésitation à accepter les résultats observés (***Hunter & Goodchild, 1993***). Il s'agit de l'éventail des doutes, incohérences, erreurs, ignorances, imprécisions, la fiabilité, la clarté qui fondent ses attributs distinctifs (***Crosetto et al., 2001; Duckham et al., 2001; Fusco et al.,***

2013; Gahegan & Ehlers, 2000). Il n'est pas rare de définir cette incertitude comme le niveau de certitude de l'utilisateur face à l'information qu'il observe ; à l'instar des expérimentations #1 et #2. Thomson et al. (*2005*) ont proposé une typologie de l'incertitude (Tableau 21) en se fondant sur la taxonomie de Gershon (*1998*) et la classification de Pang et al. (*1997*).

Tableau 21 : Termes et définitions générales pour les catégories d'incertitudes (modifié par Thomson et al., 2005)

Catégorie	**Définition**	**Composante attributaire**	**Composante spatiale**	**Composante temporelle**
Exactitude/erreur	Différence entre l'observation et la réalité, généralement estimée sur la base de la connaissance du dispositif de mesure/estimation et des phénomènes dans l'œuvre.	Compte, magnitude	Coordonnées, bâtiments	+/- 1 jour
Précision	Exactitude de la mesure/estimation, dérivée des paramètres de la mesure, du dispositif d'estimation et/ou de la procédure.	Proche de 1000	1 degré	Une fois par jour
Complétude	Mesure dans laquelle l'information est complète.	75% des rapports	20% de couverture nuageuse	5 échantillons sur 100
Consistance	Mesure dans laquelle les éléments d'information concordent. Il s'agit d'une définition plus générale que celle que l'on trouve dans les normes officielles relatives aux données spatiales.	Classificateurs multiples	"d'un lieu" vs "pour un lieu"	5 disent M ; 2 disent T
Traçabilité	Cheminement par lequel l'information est passée. Catégorie complexe qui comporte au moins les sous-composantes suivantes : nombre d'individus, d'organisations, de processus par lesquels passe l'information.	Transformations	Nombre de sources d'entrée	Nombre d'étapes
Actualité/Occurrence	Dépend de la durée et de l'occurrence à l'utilisation, en passant par la collecte/le traitement des informations, et le contexte.	Données de recensement	Date de production d'une carte	5 heures avant
Crédibilité	Combinaison de facteurs qui assure la fiabilité de la source d'information.	Informateur local	Connaissance du lieu	Fiabilité du modèle
Subjectivité	La mesure dans laquelle l'interprétation ou le jugement humain est impliqué dans la construction de l'information.	Fait / supposition	Local / extérieur	Expérimenté / Inexpérimenté
Interdépendance	Indépendance de la source par rapport aux autres l'information. Il s'agit d'une norme utilisée dans les médias pour évaluer la certitude qu'une histoire est authentique	Même auteur	Proximité des sources	Proximité temporelle

Ainsi, l'incertitude peut se définir selon plusieurs catégories ayant chacune des composantes attributaires, spatiales et temporelles qui intéressent particulièrement les recherches sur la visualisation des incertitudes (*Kunz & Hurni, 2011*).

Les sources de l'incertitude

Riveiro (***2007***) suggère que ces erreurs et incertitudes peuvent être introduites à différents stades du schéma générique des systèmes d'information (***Pang et al., 1997***). Ce dernier, introduit par Wittenbrink et al., (***1996***), est conceptualisé sous la forme d'un pipeline qui se divise en trois étapes : l'acquisition des données, la transformation des données et la visualisation des données (Figure 146). Il permet d'identifier l'effet des incertitudes sur l'interprétation et l'analyse des données afin d'en illustrer les sources d'erreurs.

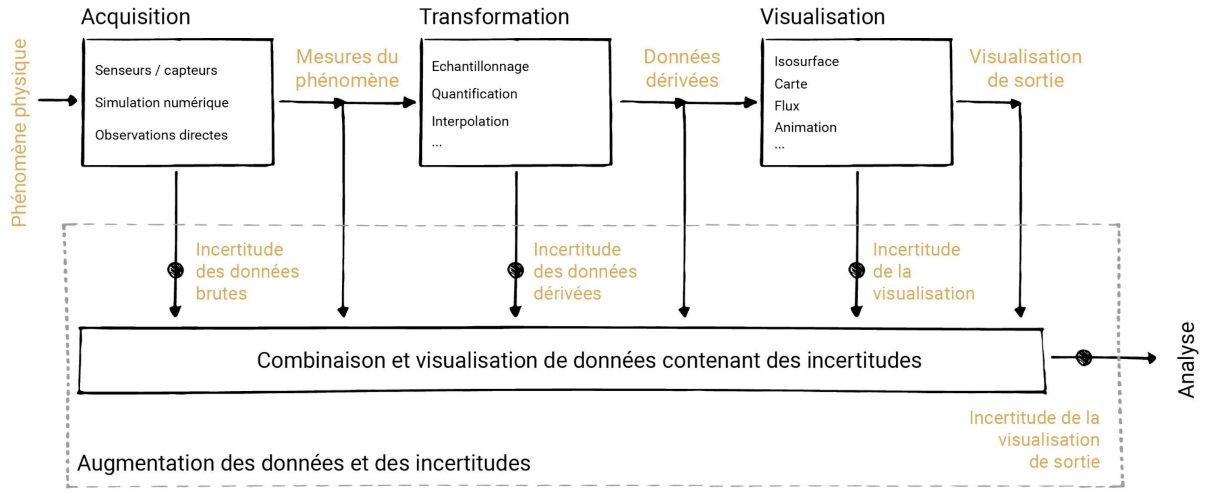


Figure 146 : Cheminement de l'incertitude dans le système générique de l'information (adapté de Pang et al., 1997; Riveiro, 2007; Wittenbrink et al., 1996)

La figure ci-dessus montre où les incertitudes sont introduites dans le cheminement de l'information et comment elles se propagent à chacune des étapes du modèle. Elles apparaissent dès la phase d'acquisition des données, liées alors aux modèles utilisés et aux mesures effectuées qui présentent des variabilités statistiques (***Chatfield, 1983***). Ces variations sont présentes aussi bien pour les données provenant de modèles numériques que celles observées par l'humain (***Pang et al., 1997***) avec pour origine : une résolution limitée des capteurs, d'un bruit trop important, d'un mauvais étalonnage, d'une couverture nuageuse trop importante, etc. (***Chung & Wark, 2016***) ou encore d'une différence subjective lorsqu'on parle de variables humaines.

Les incertitudes peuvent être introduites lors de la transformation ou de la conversion des données brutes sous forme de données traitées, normalisées, calculées, etc. (***Chung & Wark, 2016***). Il peut s'agir d'une transformation algorithmique d'une ou plusieurs données, ou encore de processus comme le redimensionnement, la généralisation et la quantification qui précédent l'étape de visualisation (***Pang et al., 1997***). Ces traitements introduisent des erreurs qui peuvent apparaitre dès les phases d'acquisition où lors de la phase de visualisation, à partir du moment où la donnée d'origine est modifiée.

La troisième étape introduit une incertitude qui est liée à la phase de visualisation des données dérivées. Cette incertitude, plus difficile à cerner, fait l'objet de nombreuses recherches depuis les années 1990. Les chercheurs ont démontré notamment qu'elle pouvait être introduite par la combinaison des incertitudes issues des phases d'acquisition et de transformation des données brutes (***Pang et al., 1997***).

En outre, ces chercheurs ont mis en avant qu'elle pouvait s'expliquer par des approches et des méthodes de calcul différentes, dont les résultats servaient à visualiser des rendus similaires. Depuis, de nouveaux types d'incertitudes sont apparus au gré des nouvelles méthodes de transformation et de visualisation des données qui ont vu le jour (***Chung & Wark, 2016***).

Le cheminement de l'incertitude dans notre recherche

Dans notre cas, cette incertitude prend diverses formes dont le cheminement est schématisé par la Figure 147. L'incertitude est introduite dès l'acquisition des données brutes (cf. supra 3.3.1). L'imagerie satellitaire est contrainte, même encore aujourd'hui, par la capacité des capteurs, des senseurs, mais également des conditions atmosphériques, etc., qui vont nuire à la qualité des images et des données exploitables. Une fois les images acquises, des incertitudes sont introduites par les méthodes de traitement de la donnée. Qu'ils soient automatiques, semi-automatiques ou humains (par photo-interprétation), les traitements de l'information introduisent des biais liés d'une part aux capacités des modèles, des logiciels, etc., et d'autre part, à la disponibilité des images pré-crises, aux connaissances, et autres conditions subjectives du photo-interprète. Ces capacités sont dépendantes de la qualité de la donnée et des images exploitées. Une fois les informations traitées, elles font l'objet de transformation afin d'être transposées sous la forme cartographique. Les incertitudes sont alors de nouveau introduites par les méthodes d'agrégation, de quantification et d'échantillonnage des données. Ces transformations peuvent être amenées de manière volontaire, afin de lisser la donnée et gagner en rapidité et en efficacité visuelle. En fonction de ces méthodes, les résultats et le message final peuvent diverger (cf. supra 6.2). Ils peuvent être également différents pour une même technique en fonction des emprises ou des méthodes de calcul utilisées. C'est par exemple le cas des méthodes de carroyage ou d'interpolation.

Vient ensuite la visualisation de la donnée. Cette nouvelle phase marque encore une fois, l'intégration d'incertitudes qui sont bien souvent héritées des étapes précédentes. En effet, elles concrétisent cartographiquement les erreurs pouvant se produire dans le processus de transformation des données (***Brodlie et al., 2012***). En parallèle, la conception cartographique intègre un ensemble de règles qui, si elles ne sont pas respectées, peuvent nuire à la lisibilité et à la qualité du message à interpréter. Ces problématiques sont bien souvent liées à la nature de l'information et à la façon dont elle est cartographiée. L'analyse des signatures visuelles illustre comment la sémantique même d'une couleur peut créer des incertitudes. Par exemple, les couleurs chaudes sont utilisées à la fois pour estimer les niveaux de dommages et la quantité de bâtiments. Il s'agit de deux informations bien distinctes qui sont pourtant portées par la même variable visuelle (cf. supra 5.3). Le rôle du concepteur et ses connaissances cartographiques sont donc importants, car ils peuvent nuire à la qualité du message final de la carte, et ceci à l'insu des lecteurs qui maintiennent un haut niveau de confiance envers ces représentations cartographiques. De plus, la diversité des modes de représentation est particulièrement marquée aux petites échelles. Là où les données sont nombreuses et où des capacités de synthèse graphique sont essentielles afin de faciliter la lecture des données. La diversité des méthodes observées nuit à la construction d'une identité cartographique internationale. Elle ne permet pas d'assurer un niveau d'interprétation correct à l'ensemble des utilisateurs de ce type de produit avec pour conséquence des

erreurs d'interprétation et des messages potentiellement divergents au sein d'une même carte et/ou de plusieurs cartes qui présentent la même donnée. En cela, l'expérimentation #1 (cf. supra 6.2) a démontré comment cette incertitude de visualisation donnait lieu à une incertitude dans la compréhension et l'interprétation du message par les utilisateurs et finalement sur les processus de décision.

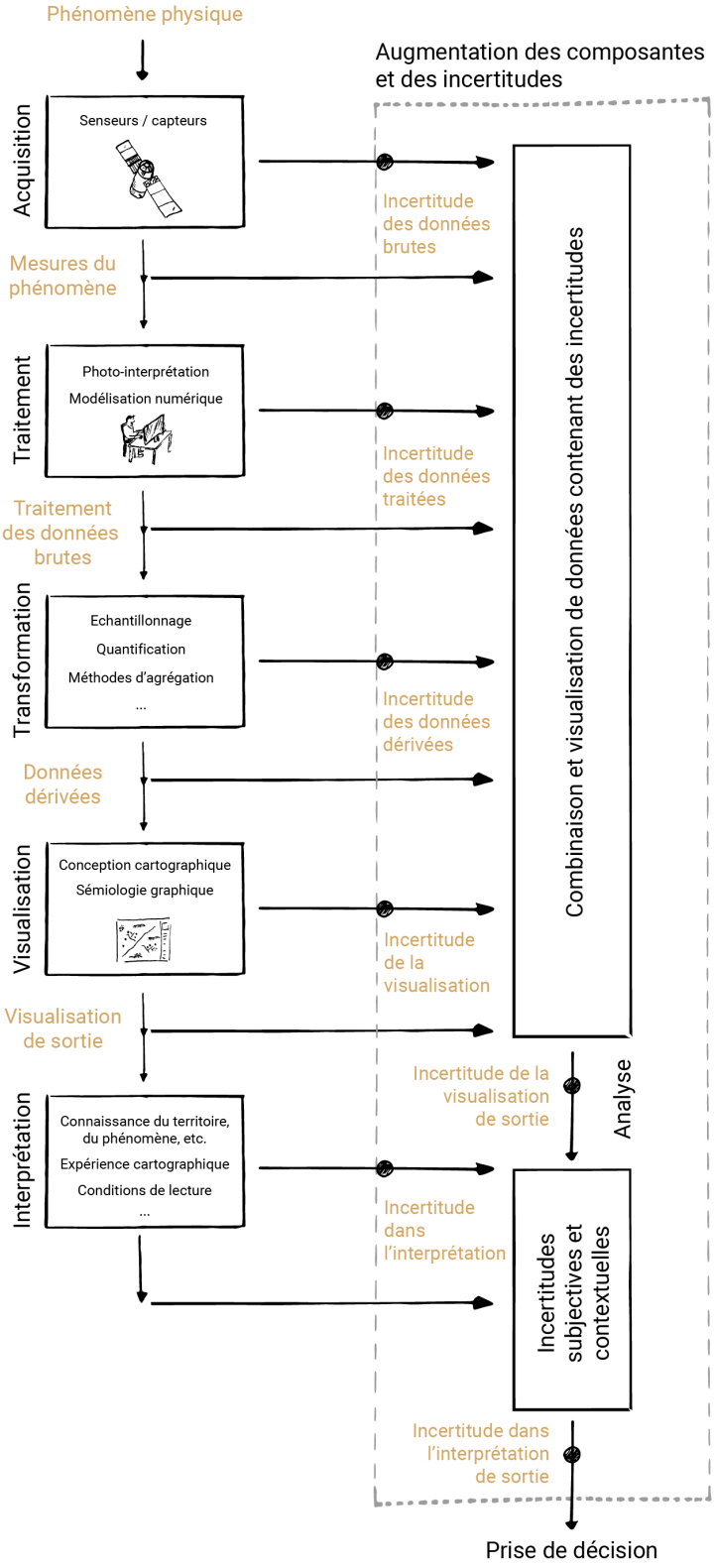


Figure 147 : Cheminement de l'incertitude dans la cartographie des dommages post-catastrophes

Cette première expérimentation a également démontré comment, et ceci malgré une formation similaire, les perceptions et les processus cognitifs individuels font partie des composantes de l'incertitude interprétative à l'échelle collective. L'analyse des résultats a mis en avant des erreurs d'interprétation que l'on retrouve tout au long de nos expérimentations (#2 et #3). Elles viennent renforcer l'hypothèse selon laquelle l'incertitude n'est pas uniquement enclavée aux étapes qui conditionnent le système générique de l'information, de l'acquisition à la visualisation. L'incertitude finale est le produit d'un cheminement qui s'installe dès le début et qui se concrétise par la prise de décision de/des utilisateur(s) (***Fusco et al., 2013***). Cette incertitude finale entraîne donc des répercussions sur les actions à réaliser et sur l'utilité de la carte dans les processus de gestion de crise et des risques de manière générale.

À titre d'exemple, nous pouvons illustrer ce cheminement par le cas concret du cyclone Irma qui a touché le Nord des Caraïbes en 2017. À Saint-Martin, l'évaluation et les observations des données satellitaires et de terrain ont fait état d'une acquisition partielle de la situation des dommages à cause notamment des conditions atmosphériques et de la spécificité des formes d'endommagements (liées aux vents et/ou à la houle)(***Rey et al., 2019, 2020***). De plus, plusieurs services ont été mobilisés à travers la CHARTE et Copernicus. Les photo-interprètes, dont les connaissances sur l'événement et l'expérience varient, ont utilisé une grille d'endommagement commune (EMS98), mais dont la typologie a été interprétée et adaptée par chacun des services. Les dommages ont été détaillés à l'échelle du bâti dans les plus brefs délais. Ces deux organismes ont produit des données à plusieurs échelles et ont fait varier les méthodes et la nature des informations sur le dommage. Les différents acteurs de la gestion de crise qui ont pu bénéficier de ces produits possèdent des connaissances variées, des missions et des échelles d'intervention variées. En situation de stress aigu, ils ont dû rapidement prendre des décisions et se concerter entre eux. Tous ces facteurs alimentent une incertitude finale intégrée dans des processus de décisions et dont une grande partie des composantes sont bien souvent méconnues des utilisateurs.

Face à ces sources d'incertitudes, la méthode développée de représentation des dommages par un semi-régulier de points proportionnels permet de réduire certaines erreurs d'interprétation en bout de chaine de la cartographie *post*-catastrophes. La première est directement liée à la nécessité d'afficher une information bivariée (quantité et qualité), de manière simple et efficace, afin de réduire les erreurs d'interprétation que l'on retrouve dans les expérimentations #1 et #2. On introduit également la possibilité de travailler à plusieurs échelles, ce qui permet d'assurer un continuum interprétatif et donc de réduire les erreurs d'interprétations engendrées par des techniques d'agrégation comme les blocs urbains. Cependant, cette méthode de représentation n'élimine pas complètement ces erreurs d'interprétation. Les expérimentations #2 et #3 ont par ailleurs démontré que les taux de mémorisation et perception visuelle pouvaient encore être améliorés. Elles ont aussi permis de mesurer en partie les incertitudes interprétatives *a posteriori* de la construction des cartes. Comme de nombreux travaux antérieurs, ces expérimentations ont soulevé l'intérêt d'identifier l'impact de certains paramètres comme l'agrégation des données. Bien que cette représentation tende à réduire les incertitudes en bout de chaine, elle n'intervient pas dans les incertitudes introduites par l'acquisition et le traitement des données spatiales (évaluation des dommages à partir de la photo-interprétation).

Terra incognita, les espaces incertains en gestion de crise

L'incertitude est le résultat de processus complexes et combinatoires qui affectent la prise de décision (***MacEachren et al., 2005***). En gestion de crise, cette notion est un paramètre fondamental (cf. supra 0). Elle se concrétise par des situations incertaines qui résultent d'une « confusion dans les causes, les effets et les moyens de résolution » (***Pearson & Clair, 1998, p. 61***). Dans ce contexte, le décideur doit penser et expérimenter ces incertitudes afin d'imaginer l'imprévisible et définir des stratégies d'actions en considérant ce qui est connu et inconnu. Pour cela, il utilise un grand nombre d'outils, dont la cartographie (cf. supra 2.2), qui lui permet de comprendre le phénomène en cours et d'en estimer les conséquences, par exemple les zones sinistrées. Par ailleurs, ces informations présentent un grand nombre d'incertitudes (***Hoarau et al., 2018***) qui s'étendent par définition aux supports qui sont utiles et qui influencent les décisions prises durant la gestion d'une crise (***Chung & Wark, 2016***). Les gestionnaires de crise, qui sont confrontés à des espaces incertains (quelles sont les conséquences de l'événement sur le territoire), n'ont pas connaissance de la fiabilité des données dont ils disposent. Imprécisions qui peuvent être renforcées par l'hétérogénéité des données utilisées pour produire ces supports, ou par le manque d'interdépendance entre différentes sources d'information (cf. supra 3.3). Néanmoins, ces données n'en restent pas moins essentielles pour les secours. Il devient crucial d'intégrer visuellement cette information pour alimenter la prise de décision (***Arnaud & Davoine, 2009a***) et faire prendre conscience de la présence, de la nature et du degré d'incertitude des données (***Deitrick, 2007; Hoarau et al., 2018***). Dans le cas contraire, cela peut entraîner des conséquences indésirables (***Agumya & Hunter, 2002***) pour les décideurs qui tireront alors des conclusions inexactes (***Olston & Mackinlay, 2002***).

Dès lors la réflexion n'est pas tant de réduire les incertitudes en amont, mais plutôt de les quantifier, de les qualifier et de les traiter visuellement afin d'en réduire l'impact en aval. Malgré l'intérêt que représente cette donnée pour les décideurs, très rares sont les supports visuels qui proposent d'en montrer les conséquences spatiales et attributaires. Les incertitudes sont généralement mal perçues, notamment par les profanes (***Decrop, 1997***), et font l'objet d'un dénigrement aboutissant à une faible représentation thématique dans les cartes. En outre, plus l'incertitude devient abstraite et plus elle devient difficile et moins pertinente à représenter pour la prise de décision (***Chung & Wark, 2016***). Néanmoins, le fait que l'IWG-SEM[51] (2018) propose une échelle réduite à quatre niveaux d'endommagement, dont les bâtiments « potentiellement endommagés », témoigne de cette prise en compte progressive de l'incertitude dans ce type de produit. Lorsque l'acquisition et le traitement de l'information ne permettent pas d'estimer correctement un endommagement, cette incertitude est traduite par des dommages potentiels.

Ainsi, le choix de qualifier cette information et de l'afficher souligne son intérêt dans les processus de décision. La typologie introduite par l'IWG-SEM dans l'analyse des dommages pourrait faire l'objet d'un approfondissement, notamment en établissant un niveau de fiabilité de l'interprétation. Ce dernier prendrait en compte des mesures dites qualitatives et quantitatives sur les divers processus d'acquisition et de traitement de la donnée satellitaire. Ce niveau de fiabilité intégrerait par exemple des mesures de

[51] International Working Group on Satellite-based Emergency Mapping : https://www.un-spider.org/network/iwg-sem

qualité des images, de résolution, de niveau d'occultation, ou encore de densité de la trame urbaine (***Candela et al., sous presse***). Il est également possible de mesurer cette incertitude par le degré de précision des analyses subjectives (***Zhang & Goodchild, 2002***) ou par les écarts entre plusieurs diagnostics de dommages (cf. supra 3.3.1). Il s'agit ainsi d'identifier les incertitudes en amont, de les pondérer et de les filtrer en fonction de leur utilité afin d'assurer un transfert complet des connaissances sur le territoire. L'idée étant que le gestionnaire de crise doit se faire « découvreur » (***Boorstin, 1986; Lagadec, 2019***) de ces espaces incertains, là où la donnée relative aux dommages doit être vérifiée sur le terrain.

12.3.2. Les processus graphiques existants pour représenter l'incertitude

La visualisation de l'incertitude

Il existe bien des manières de représenter les différents types d'incertitudes que l'on retrouve dans la typologie de Thomson et al. (***2005***). En cartographie, cette thématique a fait, et fait encore, l'objet de nombreux travaux dont les plus aboutis permettent le traitement des données et leur intégration sous SIG à des fins de visualisation. En effet, comme l'incertitude intègre de nombreuses composantes spatiales et attributaires, la carte se trouve être un moyen efficace pour présenter et évaluer cette information (***Merz et al., 2007***). Par conséquent, la recherche sur l'incertitude a très rapidement été accompagnée par une étude des moyens qui permettraient de la visualiser (***Kunz, 2011***). Ces visualisations peuvent être univariées, ce qui signifie que les données relatives à l'information et son incertitude sont séparées sur deux cartes bien distinctes, ou bivariées, c'est-à-dire sur la même carte. De la même manière, les incertitudes peuvent être intrinsèques à l'image graphique ou extrinsèque, c'est-à-dire en dehors de la carte (***Kunz & Hurni, 2011***). Dans notre étude, nous avons fait le choix de la construction d'une information bivariée.

Buttenfield et Ganter (***1990***) ont été les premiers à suggérer une utilisation des variables visuelles de Bertin (***1967***). Ces dernières, notamment à travers l'étude de la sémiotique visuelle, offrent un cadre théorique intéressant pour la représentation d'une information et du niveau d'incertitude qui peut lui être associé (***MacEachren et al., 2012***). Ces auteurs proposent notamment d'intégrer ces variables pour représenter l'incertitude à partir de cinq types de qualités de données (positionnement, attributaire, consistance, complétude et traçabilité) en fonction de trois types d'attributs de données (qualitatif discret, qualitatif et quantitatif continu) (***Thomson et al., 2005***). MacEachren et al., (***2012***) étendent ces réflexions. Ils proposent plusieurs modes de représentation de l'incertitude spatiale, attributaire et temporelle, dont la symbologie s'inspire du concept des variables visuelles de Bertin et qu'ils complètent par les variables de saturation et d'arrangement tirées des travaux de Morrison (***1974***), ainsi que des variables de floues (foyer), de résolution et de transparence proposées par MacEachren (***1995***) (Figure 148). Pang (***2008***) propose également l'utilisation de techniques comme les glyphes, les isolignes, les histogrammes, boites à moustaches ou encore les surfaces 3D complexes.

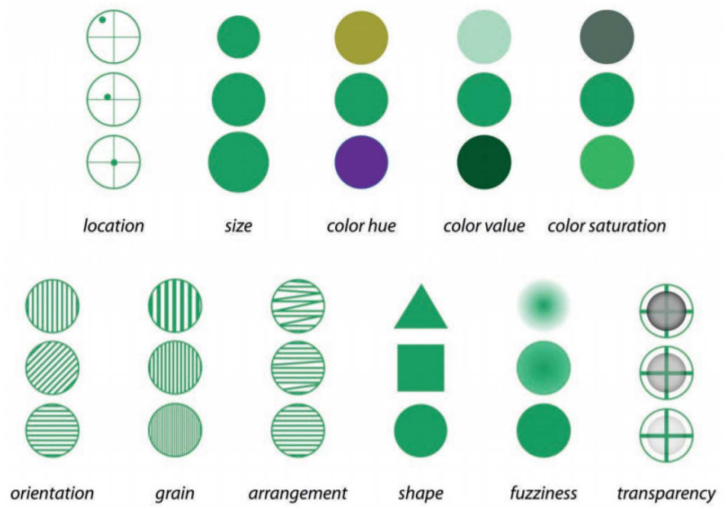


Figure 148 : Variables visuelles applicables à la représentation de l'incertitude (MacEachren et al., 2012)

Plus récemment, Leone et al., (***2020***) ont mis en application ces méthodes. Dans leur étude sur la mortalité face aux cyclones en Guadeloupe, ces auteurs proposent le remplissage d'un symbole de cible pour présenter la précision du géoréférencement des victimes directes dues aux aléas hydroclimatiques. Ces techniques s'inspirent des barres remplies d'un *slider* proposées par MacEachren et al., (***2012***). L'étude de Leone et al., (***2020***) intègre également une visualisation web des mêmes données. Cette fois-ci, l'incertitude de la localisation des victimes est exprimée par une aire de recherche, représentée par un figuré ponctuel venant se placer sous l'information thématique, qui croît ou diminue en fonction de la précision du géoréférencement[52].

Les variables visuelles et techniques peuvent être utilisées de manière combinatoire, en utilisant la couleur et la taille pour illustrer plusieurs propriétés de l'incertitude (***Buttenfield & Ganter, 1990***). Arnaud et Davoine (***2009a***) par exemple, proposent l'utilisation du « foyer » ***(MacEachren, 1995***) pour représenter des localisations incertaines en ajoutant des variables figuratives pour caractériser le niveau de certitude de l'information cartographiée. Cependant, les auteurs avertissent que cette information reste complexe à cartographier. Ils mettent en avant les problèmes de surcharge cognitive qui résultent de telles applications méthodologiques. Représenter l'incertitude repose sur une compréhension graphique et mentale, car cette notion résulte de phénomènes non tangibles qui peuvent être difficiles à appréhender par les profanes. Pour être efficaces, ces représentations doivent être simples et réservées aux données les plus utiles à la prise de décision (***Pang, 2008***) sans quoi elles peuvent engendrer une perte d'efficacité, et des temps de lecture plus poussés. Afin d'éviter les erreurs d'appréciation, les représentations de l'incertitude doivent prendre en compte des règles de sémiologie graphique (***MacEachren et al., 2005***), mais elles doivent également s'intéresser à la sémantique visuelle et métaphorique qu'inspire cette information.

[52] Lien vers la carte web : *https://geodata.univ-montp3.fr/web-app/sig-victimes/*

Le principe de métaphore visuelle

L'incertitude est par définition un concept abstrait. Représenter cette information relève donc de la métaphore visuelle et donc de l'importance du signifiant et du signifié dans la symbolisation cartographique. Ces deux notions, métaphore et symbolisation, font écho aux travaux de Lakoff et Johnsen (***1980***). Ces dernières proposent d'utiliser les métaphores afin d'organiser l'information dans des domaines abstraits dont fait partie la cartographie. À l'instar des travaux de la sémiologie graphique, il s'agit d'atteindre un niveau de compréhension efficace grâce à l'abstraction métaphorique des réalités physiques. Les métaphores conceptuelles par exemple, utilisent des concepts concrets et physiques pour définir un concept cible, plus abstrait (***Boroditsky, 2000; Kovecses, 2010***). Comme pour la sémiologie graphique, ces sources métaphoriques sont dépendantes des connaissances et des expériences individuelles. Pour produire une métaphore efficace, il est donc nécessaire d'avoir des similitudes entre le concept source et le concept cible que l'on souhaite représenter. Elle doit également être suffisamment commune pour être facilement perçue par un ensemble de lecteurs. Pour illustrer nos propos, cette pratique se concrétise en cartographie par l'utilisation de métaphores spatiales, topographiques (***Severo & Venturini, 2016***) en lien avec nos perceptions des paysages. Elles sont également figuratives lorsqu'elles utilisent des symboles figuratifs (iconiques) pour désigner des lieux bien spécifiques. Un avion désigne bien souvent les aéroports et ceci pour la majorité des personnes qui visualise ce symbole. Cela se concrétise également par l'utilisation du flou et de la transparence chez MacEachren (***1995***), ou encore de la netteté afin de définir des espaces ou des données incertaines. Comme pour d'autres domaines, le fait de jouer sur l'opacité d'un objet est directement lié à ce principe de métaphore visuelle. Cette technique est par exemple utilisée en archéologie pour représenter les incertitudes structurelles lors des reconstitutions en 3D de bâtiments (***Favre-Brun, 2013***). De la même manière, il sera plus facile d'estimer le visage d'une personne sur une image nette, donc de très haute résolution, que sur une image pixélisée, de faible résolution.

Sur la base de ces principes et de ceux portés en sémiologie graphique et en cartographie, il semble intéressant de réfléchir à une représentation visuelle dont le niveau de perception doit à la fois être prédominant, afin de tirer parti des processus pré-attentifs, et dont les métaphores visuelles permettront une correspondance plus aisée avec le type d'incertitudes à représenter. Pour cela, la représentation doit intégrer un degré d'iconographie à la fois dans sa forme picturale et dans sa forme géométrique afin qu'elle soit suffisamment emblématique pour être reconnue aisément par les utilisateurs. En outre, cette représentation prend place dans un processus de gestion de crise. Elle doit donc être visible et participer à la contextualisation d'espaces incertains auprès des décideurs et les inciter à des investigations plus poussées sur le terrain. De plus, cette représentation doit pouvoir être employée à différentes échelles. Pour cela, les techniques visuelles comme le flou ou encore la transparence sont intéressantes, car elles sont propices à la métaphore des incertitudes. Elles sont d'autant plus intéressantes qu'elles sont grandement facilitées par les logiciels de SIG. Néanmoins, elles sont soumises aux mêmes problématiques que la représentation des dommages. Implanter de manière ponctuelle, où à l'échelle des bâtiments, cette visualisation ne permet pas l'analyse générale de cette donnée. De plus, les recherches empiriques à ce sujet ne permettent pas encore d'estimer l'impact que peut avoir la distribution spatiale de cette symbolisation sur l'interprétation (***MacEachren et al., 2012***).

12.3.3. Représentation de l'incertitude attributaire par des stimuli visuels naturels : la variable d'occultation

De la métaphore à la visualisation du « brouillard de guerre », « de la crise »

La célèbre métaphore du « brouillard de guerre » est un point de départ pour la représentation des incertitudes spatiales. « La grande incertitude [liée au manque] d'informations en période de guerre est d'une difficulté particulière parce que toutes les actions doivent dans une certaine mesure être planifiée avec une légère zone d'ombre qui (...) comme l'effet d'un brouillard ou d'un clair de lune, donne aux choses des dimensions exagérées et non naturelles » (***Clausewitz, 1832, trad. par Naville, 1955***). Lorsqu'il aborde ce « brouillard », appelé plus communément « brouillard de guerre » (*fog of war*), l'officier et théoricien militaire prussien Carl Von Clausewitz (1780-1831) fait référence aux incertitudes qui naissent du champ de bataille (***Desfachelles, 2015; Desportes & Cuche, 2007; Dubois, 2017***).

Cette métaphore singulière, privilégiée dans le domaine militaire, emprunte les caractéristiques naturelles du phénomène physique : amas de gouttelettes en suspension dans l'atmosphère, à la surface de la Terre, qui se distinguent entre autres de la brume par la distance de visibilité qui est réduite à 1 kilomètre. Le brouillard exprime ainsi une incertitude sur les connaissances du terrain, du positionnement et des capacités de l'ennemi dans le théâtre des opérations militaires. Couche (***2018***) souligne néanmoins que le brouillard, et ceci bien avant d'être considéré comme un phénomène météorologique en1538 (***Rey, 2011***), est un terme qui fait l'objet de multiples significations. Il désigne un état transitoire, de confusion de l'esprit et autres connotations imaginaires et religieuses qui donnent un côté sombre au brouillard. L'auteur parle aussi de l'état de désorientation, dans l'espace et le temps qui fait allusion à la perte de repère qui se produit lorsque l'on se retrouve à l'intérieur d'un brouillard. L'ensemble de ces désignations confère au brouillard une connotation métaphorique appropriée à la définition d'espaces incertains, des incertitudes subjectives du décideur et que l'on retrouve notamment dans de nombreuses œuvres picturales. À l'instar du commandant des opérations militaires, les gestionnaires de crises sont aussi confrontés au brouillard de la crise (***Meszaros, 2017***) qui nait d'une catastrophe. La question est alors de savoir comment visualiser cette information contextuelle sur une carte ?

Contrairement aux méthodes de visualisation de l'incertitude détaillées précédemment, il s'agit ici d'occulter les informations les moins fiables sans pour autant cacher leur localisation. En cartographie, cette approche visuelle donne lieu à la combinaison de différents motifs, couleurs et textures afin de produire des effets « d'éblouissement » qui viennent camoufler ou empêcher la visualisation des zones dont les données sont incertaines (***Drecki, 2002***). Elles se traduisent aussi par des techniques comme le « brouillard » ou la « brume » qui sont également développées et employées pour obscurcir certaines zones de l'affichage tandis que d'autres restent claires (***McGranaghan, 1993***) ou encore l'utilisation de géométries floues représentant des zones brumeuses et fictionnelles (***Piatti et al., 2009***).

L'allusion au brouillard inspire également l'univers du jeu vidéo (***Couche, 2018; Grandjean, 2018***), en l'occurrence à travers les dispositifs cartographiques. Pour illustrer nos propos, prenons l'exemple des cartes stratégiques. Le brouillard de guerre dissimule les zones que le joueur n'a pas explorées et se dissipe peu à peu alors que le joueur découvre son environnement (***Grandjean, 2018***). Les espaces visités, qui étaient jusque-là représentés sous la forme de pixels noirs, sont éclairés et dévoilent l'occupation du sol. Lorsque le joueur se déplace, ces espaces s'obscurcissent de nouveau, mais cette fois-ci de manière semi-transparente. Le brouillard de guerre est ainsi représenté par plusieurs couches de floutage et de codes couleur afin de désigner les zones inexplorées, hors champ et visibles (***Couche, 2018***). Ce processus fait écho à la création de cartes mentales qui simulent une mémoire à l'instant T d'un espace géographique. Dans l'univers du jeu vidéo, cette pratique incite les joueurs à découvrir et explorer ces territoires inconnus. Bien souvent, cette exploration est liée à des quêtes (tâches) à accomplir afin de compléter les objectifs de la partie.

Ainsi, et comme pour la représentation cartographique des dommages *post*-catastrophes, la visualisation des incertitudes doit veiller à stimuler les activités cérébrales de notre cortex tout en facilitant l'interprétation métaphorique de cette donnée. Pour cela, le « brouillard de guerre » est intéressant, car il simule une typologie de surfaces occultantes qui s'applique au-dessus de l'information thématique. L'effet d'éblouissement ou d'obscurcissement permet ainsi une intégration bivariée des données et des niveaux d'incertitudes attributaires ou spatiales qui peuvent être définis lors des phases de traitement de l'information. En outre, cette intégration a pour vocation de ne pas faire disparaitre les données incertaines. Elle incite plutôt le décideur à considérer des zones où les niveaux de dommages issus des processus de photo-interprétation sont trop incertains et qu'il faut aller vérifier sur le terrain.

Simuler un brouillard pour représenter l'incertitude des analyses dérivées du satellitaire

La principale contrainte à relever est celle de la représentation multiscalaire, puisque comme pour les dommages la visualisation des incertitudes doit être réalisable à plusieurs échelles de travail. Cette représentation du brouillard s'inspire de la méthode développée par Dylan Moriarty[53] et présentée lors de la réunion annuelle de la société nord-américaine d'information cartographique de 2017[54]. Elle consiste à générer un masque d'occultation pour mettre en évidence des aires d'intérêts. Cette technique, réalisée sous SIG, requiert la création de polygones correspondant aux aires d'intérêts et l'utilisation d'un moteur de rendu de polygones inversés afin d'occulter les zones se trouvant en dehors de ces aires. Les zones embrumées sont composées d'une multitude de points dont l'opacité diminue dès lors qu'on s'éloigne des aires d'intérêts (Figure 149).

[53] *https://dylanmoriarty.github.io/blog/foggy-spaces.html*

[54] Lien vers la retranscription vidéo du NACIS : *https://archive.org/details/NACIS_2017-Salons_4-5_Day_2/Foggy+Spaces%2C+Maps+of+Nostalgia+%E2%80%94+Dylan+Moriarty-V6AxuG2WIZk.mp4*



Figure 149 : Espace de brouillard (Moriarty, 2017)

Cette technique a été adaptée à nos besoins afin de produire une occultation des données les plus incertaines. Selon Rubin (***1915***), cela signifie une observation sur plusieurs plans, soit de la valeur réelle des données (arrière-plan) soit de l'incertitude (premier plan) (***Jäckle et al., 2015***). Il s'agissait de définir les aires qui sont les plus sujettes à des incertitudes attributaires quant aux évaluations des dommages. Cette méthode revient à définir des polygones analogues aux aires d'intérêts (aires d'incertitudes) de la méthode de Moriarty (***2017***) et de ne pas appliquer le moteur de rendu de polygones inversés. En outre, des apports personnels ont été intégrés à cette méthode, notamment en ajoutant une dimension de taille et de valeurs de l'opacité qui changent en fonction de l'éloignement des contours des polygones. Cela a eu pour effet de renforcer la simulation de zones imprécises et de casser les limites trop géométriques des polygones.

Le travail a été réalisé sous SIG via le logiciel QGIS. Les résultats de la comparaison entre les diagnostics du Copernicus et du SERTIT (détaillés en section 3.3.1) ont été utilisés afin d'illustrer notre approche. Pour rappel, il s'agissait du manque d'interdépendance (cf. Tableau 21) et donc de corrélation entre les diagnostics réalisés par les SEM après le passage du cyclone Irma sur Saint-Martin (partie française). Dans notre cas de figure, seuls les écarts supérieurs à deux, *c.-à-d.* qui admettent un écart d'endommagement d'au moins deux niveaux (moyen – détruit par exemple), ont été pris en compte. Par ailleurs, une distinction est faite entre les écarts de deux niveaux et ceux qui en ont trois. Elle est déterminée par la quantité des symboles occlusifs et leur niveau d'opacité général. Ce choix permet d'estimer les principales zones de divergence entre les dégâts analysés par le SERTIT et ceux donnés par Copernicus EMS. La représentation proposée intègre ainsi une logique de visibilité complète, de visibilité partielle et aucune visibilité des données qui se traduit par une incertitude modérée ou forte (Figure 150).

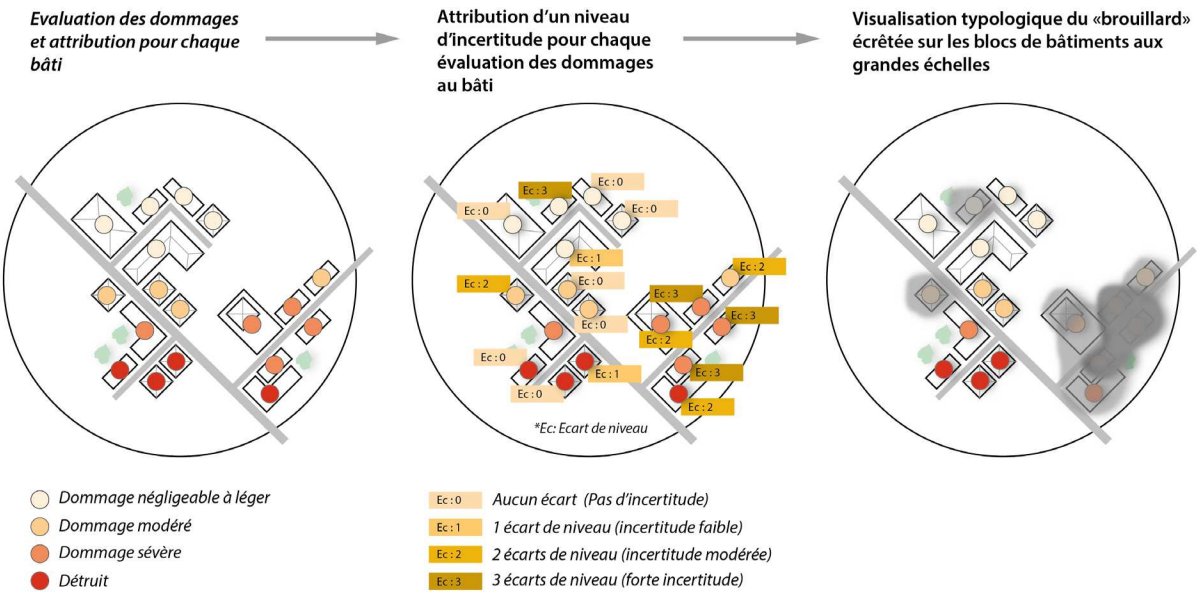


Figure 150 : Schéma de l'intégration du brouillard aux grandes échelles lors des phases d'évaluation des dommages pour représenter l'incertitude attributaire liée à la confrontation de deux jeux de données

Sur le schéma ci-dessus, la visualisation du brouillard aux grandes échelles a été délimitée à partir des blocs de bâtiments. Ces derniers ont été extraits et regroupés en fonction des degrés d'écart précédemment cités. Ils forment ainsi des entités bien distinctes sur lesquelles sont générés 10 000 points aléatoires. Par la suite, la distance de ces points au plus proche d'un *hub* a été calculée. Cet algorithme prend en compte la distance entre les entités d'origine et leur destination la plus proche, estimée ici par les contours qui délimitent chaque polygone des blocs de bâtiments. Ce paramètre permet de régler la symbologie des points afin d'obtenir l'effet visuel escompté. Plus les points s'éloignent des bords du polygone et plus leur taille augmente. De la même manière, plus la distance est importante et plus le niveau de transparence diminue. Cela a pour effet de rendre plus opaque la zone au centre des polygones et à l'inverse de la rendre plus diffuse dans les zones périphériques. Pour finir, le niveau de transparence générale des points est ajusté afin de marquer la distinction typologique entre les zones d'incertitudes modérées et celles dont les incertitudes sont les plus fortes. Les niveaux de dommages aux bâtiments sont par la suite placés sous la couche qui simule les niveaux de brouillard (Figure 151).

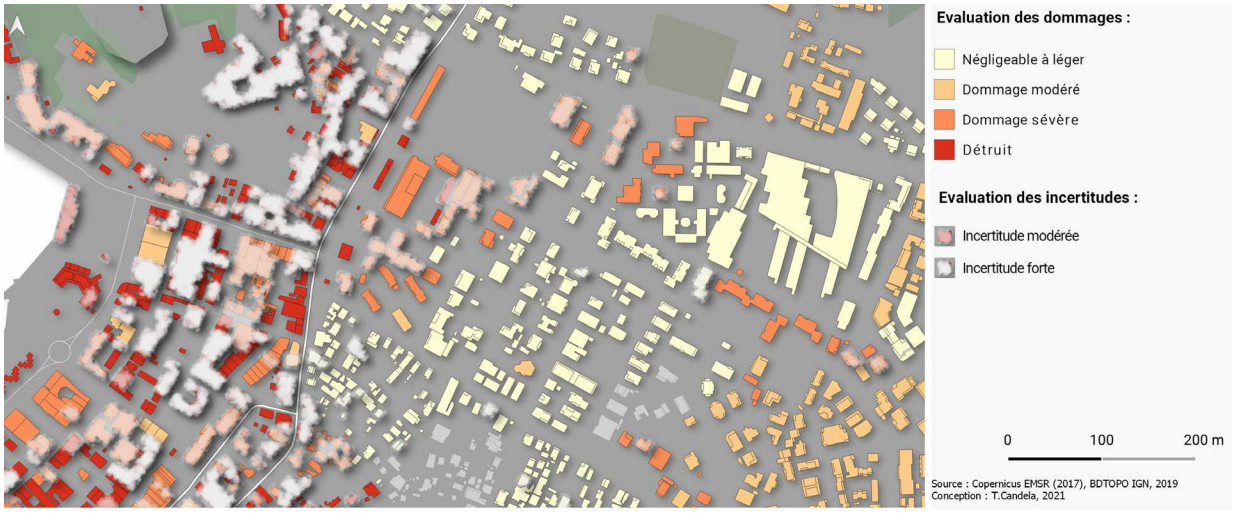


Figure 151 : Évaluation des dommages et représentation de l'incertitude attributaire à partir des blocs de bâtiments

Aux petites échelles, le processus mis en place est similaire. La principale distinction entre ces échelles réside dans le fait de ne plus utiliser les blocs de bâtiments, mais les mailles ayant servi à la création du semi-régulier de points proportionnels. Comme précédemment, les mailles dont les écarts sont égaux à deux et à trois niveaux d'écarts sont extraites et regroupées. Ces échantillons sont estimés à partir de la fréquence des écarts observés dans chacune des mailles qui composent le maillage. Là encore, une quantité souhaitée de points est générée de manière aléatoire dans l'emprise des mailles regroupées. Les distances sont calculées et permettent de définir la taille et l'opacité des points en fonction de leur éloignement aux bords. Le semi-régulier de points proportionnels est ensuite intégré sous la couche des incertitudes (Figure 152).

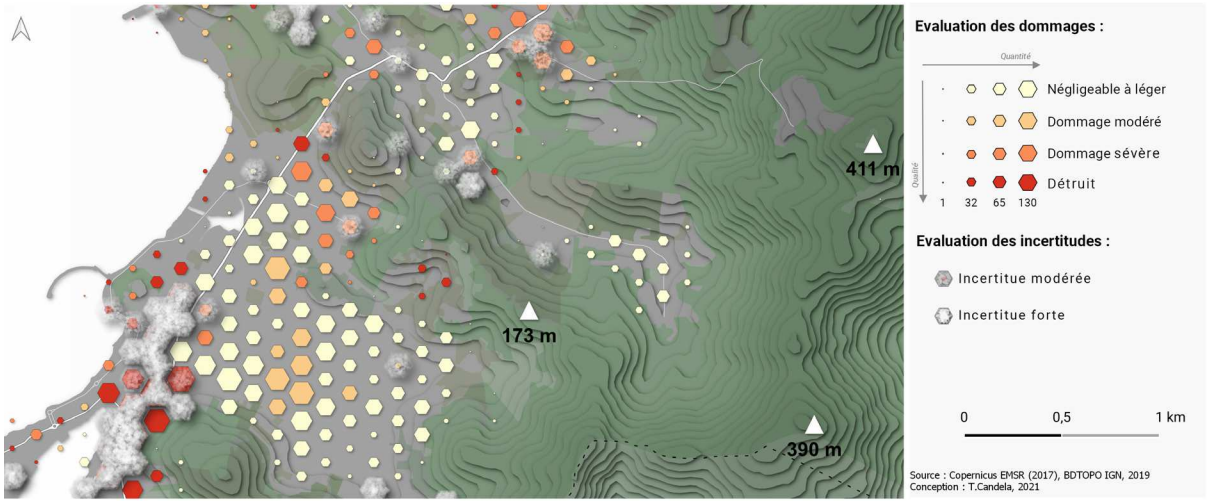


Figure 152 : Évaluation des dommages et représentation de l'incertitude attributaire à partir des surfaces maillées

Pour les deux exemples cartographiques, une teinte gris-blanc (#ededed) favorise la distinction visuelle par rapport au fond de carte. Il s'agit ici de reproduire le même effet d'éblouissement que le brouillard.

En conclusion, l'incertitude constitue aussi un facteur de décision. Ainsi, tout au long de cette partie, nous avons tenté d'appréhender les caractéristiques qui fondent l'incertitude. Spatiale, attributaire, cette dernière est complexe. Pourtant il est possible de la représenter. Dans l'expectative où un futur indice de fiabilité viendrait à être associé à la donnée produite par les services de cartographie rapide, nous proposons une représentation fondée sur la métaphore du "brouillard de guerre" issue du domaine militaire (***Candela et al., sous presse***). Un aplat zonal représentant un nuage aux limites floues occulte la visibilité des données les moins certaines. Ces zones apportent une indication essentielle aux opérationnels pour conduire des missions de reconnaissance sur le terrain, ou encore pour concentrer les pratiques collaboratives de « *crowdmapping / crowdsourcing* » (***Douvinet et al., 2017***) comme celle menée par Ushahidi lors du séisme de Haïti en 2010 (***Roche et al., 2013***).

Cette approche suit les nombreuses démarches déjà amorcées par les chercheurs afin d'en proposer une continuité réflexive autour de la notion d'espace incertain. Nous proposons ainsi de multiplier les interrogations et de renforcer les processus d'analyses et de représentation, mais également de « stimulation de la curiosité » (***Gonod, 1996***). Les acteurs de la gestion des risques et de crise prennent des décisions en exploitant les résultats et/ou les avis exprimés ou collectés par d'autres acteurs (***Tacnet, 2009***).

Il est donc important aujourd'hui de proposer des solutions permettant de répondre aux besoins croissants de visualiser ces incertitudes qui ne doivent pas être perçues comme négatives, mais comme des possibilités d'extrapolation. L'approche de la gestion des risques naturels et des crises doit placer cette incertitude au cœur de ses analyses et productions, notamment lorsqu'il s'agit d'aléas aux conséquences complexes demandant aux gestionnaires des prises de décisions tout aussi complexes.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette thèse CIFRE a permis d'explorer des solutions cartographiques d'analyse spatiale et de représentations en optimisant les capacités visuelles et cognitives, tout en améliorant les processus de décisions pour des utilisateurs variés. Ces travaux de recherche s'intéressent aux cartographies dites opérationnelles servant à la planification des actions lors des phases de gestion de crise et de *post*-crise et plus particulièrement, aux cartographies rapides des dommages *post*-catastrophes. Pour rappel, ces cartes sont produites par des services de cartographie rapide (UNOSAT, SERTIT, ITHACA, etc.) pour des organismes internationaux et régionaux, tels que la CHARTE et Copernicus EMS, afin de dresser un premier inventaire des dommages sur les territoires touchés par une catastrophe majeure. Ces évaluations de dommages sont réalisées *a posteriori,* très peu de temps après l'événement, principalement par des méthodes de photo-interprétation mono-temporelles ou multi-temporelles (avant/après événement) à partir de l'imagerie optique des satellites (Pléiades, Quickbird, GeoEye-1, etc.). Leur capacité de couverture, de réactualisation et les délais d'intervention très courts font de ces produits une aide précieuse pour les gestionnaires de crises. Aujourd'hui, ce type de cartes produites à la suite de catastrophes naturelles sont nombreuses et leur intérêt opérationnel est d'autant plus assuré que les méthodes d'acquisition et de traitement des images satellites s'améliorent.

Pourtant, les produits proposés par ces services posent certains problèmes. Cela concerne d'une part les techniques d'évaluation des dommages, mais aussi le manque d'harmonisation internationale qui est à l'origine d'une diversité des cartes d'un point de vue graphique et informationnel (***Voigt et al., 2011***). Cette diversité a été le point d'entrée de notre recherche. Cette dernière s'organise autour de grandes questions sur les paramètres qui caractérisent cette diversité et sur les conséquences que cette dernière peut avoir sur l'interprétation individuelle et collective de plusieurs utilisateurs. Ces questionnements doivent appuyer le développement d'une représentation spatiale plus efficace, à la fois sur le plan visuel et cognitif, en situation de crise, et adaptée à la pluralité des usagers impliqués dans ces périodes.

Les résultats de la thèse

Pour atteindre les objectifs et répondre aux questions soulevées par cette thèse, il a tout d'abord fallu identifier les caractères cartographiques prédominants et distinctifs qui définissent les cartes de dommages *post*-catastrophes.

Notre première contribution a constitué à la réalisation d'une grille d'analyse cartographique multicritère et d'une base de données pour définir le style cartographique d'un échantillon de cartes internationales. Cette grille fournit une méthode d'analyse des composantes cartographiques adaptables et transférables à d'autres types de cartes.

Cette analyse cartographique a mis en évidence l'existence de pratiques communes aux 204 cartes échantillonnées. On y retrouve des gammes de couleurs chaudes servant à illustrer principalement les dommages aux infrastructures (bâtiments et infrastructures critiques) au détriment d'autres informations cruciales comme l'état du réseau routier par exemple. Seules les cartes réalisées aux grandes échelles ont témoigné d'une plus grande homogénéité des méthodes de conception

cartographique. Ces dernières sont caractérisées par des représentations à dominante ponctuelle, à l'échelle des bâtiments diagnostiqués, et produites sur des fonds d'imageries satellitaires. À l'inverse, il a été plus difficile d'observer un consensus cartographique pour les cartes réalisées aux petites échelles. Ces dernières se caractérisent par une plus grande diversité des modes de représentations des dommages (carroyage, interpolation, blocs urbains, points, etc.), mais également par des informations de second plan (point d'intérêts, axes routiers, etc.) et des fonds de cartes utilisés (satellites, topographiques, administratif, etc.) plus variés. Par conséquent, il a été plus aisé de dégager un style cartographique et une reconnaissance visuelle des cartes de dommages produites à grande échelle.

Partant d'une première expérimentation, les résultats attendus visaient deux objectifs :

- Comprendre comment la diversité énoncée dans l'état de l'art et définie par notre analyse cartographique pouvait impacter la lecture et la transmission d'un message portant sur l'évaluation des dommages (pour un même territoire et une même catastrophe).
- Identifier les paramètres garantissant l'efficacité de la lecture et l'interprétation d'une information géographique, tout en limitant les biais d'interprétation liés aux conditions de stress simulé par l'expérimentation (pour les techniques disponibles à différentes échelles cartographiques, des très petites échelles aux grandes échelles).

Les résultats de cette première expérimentation ont apporté plusieurs éléments de réponses aux problématiques soulevées par la diversité des modes de représentations des dommages, en lien avec les échelles cartographiques de visualisation. Des différences de perception et d'interprétation individuelle et collective ont été observées. Elles se sont cumulées à des erreurs de lecture quantitative et qualitative des informations fournies par certaines représentations spatiales (blocs urbains, interpolation, carroyage, etc.). De manière générale, les résultats de l'évaluation cartographique se sont améliorés avec la descente d'échelle, qu'importe la tâche à accomplir et le mode de représentation. Toutefois, certaines techniques d'agrégation se sont montrées plus efficaces et mieux perçues aux petites échelles. *A contrario,* les techniques de point, plus précises, doivent se cantonner à des échelles suffisamment fines (grandes échelles) pour ne pas complexifier l'image cartographique. Cette première expérimentation a également permis d'intégrer la variable subjective de qualité visuelle de la carte, en lien avec la notion d'esthétisme. Malgré des erreurs d'interprétation observables pour certaines représentations analysées par les participants, la qualité visuelle a joué un rôle dans leur usage et le niveau de certitude qu'il leur est attribué. Il s'agit donc d'un paramètre à prendre en compte dans la conception d'une carte.

Partant de ces observations, nous avons proposé un modèle apte à la construction d'une représentation efficace, transposable et favorable à la reconnaissance visuelle tout en respectant les règles de sémiologie graphique et de cartographie.

Notre troisième contribution a porté sur la réalisation d'une représentation cartographique basée sur la méthode de carroyage et des « points de Bertin » (***Andrieu, 2014; Bertin, 1967***) dans le développement d'un **semi-régulier de points proportionnels**. Cette représentation s'est accompagnée d'une méthode de calcul des niveaux de dommages au moyen d'une fréquence améliorée permettant les regroupements typologiques de classes de dommages.

Réalisée sous SIG, cette méthode a profité des avantages du carroyage et de l'implantation ponctuelle pour fournir une information quantitative (quantité de bâtiments concernés) et qualitative (niveaux de dommages observés) au moyen de la significativité des variables de taille et de couleur. Par sa distribution carroyée, l'implantation ponctuelle bénéficie également d'une combinaison redondante entre la proportionnalité des surfaces et la densité grâce à leur position. Les différents choix techniques et sémiologiques mobilisés lors de la construction de cette représentation ont permis d'optimiser la sélectivité rétinienne des informations thématiques aux petites et moyennes échelles cartographiques et d'en favoriser les capacités cognitives.

Notre quatrième contribution a concerné la mise en place de deux protocoles d'expérimentation permettant de tester les capacités cognitives et sensorielles de la représentation cartographique par semi-régulier de points proportionnels :

- Expérimentation #2 : tester les capacités d'analyse visuelle et de mémorisation au moyen de notre représentation cartographique pour des participants exerçant une activité professionnelle et possédant un niveau de connaissances cartographiques différent
- Expérimentation #3 : tester les capacités d'analyse et de saillance visuelle de notre représentation cartographique au moyen des technologiques de l'Eye-tracking pour des participants dont la formation et le niveau de connaissances cartographiques sont proches.

Les résultats de ces deux expérimentations ont permis de tester la validité des hypothèses concernant l'apport théorique de la représentation par semi-réguliers de points proportionnels vis-à-vis de techniques d'agrégation que l'on retrouve traditionnellement dans la cartographie rapide des dommages *post*-catastrophes. Le croisement de ces résultats avec ceux issus de l'expérimentation #1 montre qu'il est impossible de généraliser l'efficacité de l'agrégation statistique d'une donnée aux petites échelles. En effet, certaines représentations mono-informationnelles comme les blocs urbains ou les méthodes d'interpolation peuvent être sujettes à de fortes confusions pour les tâches d'estimation qualitative ou quantitative. L'expérimentation #3 montre par ailleurs que ce dernier constat est indépendant du niveau cartographique des participants. De plus, les différences de résultats observés entre certaines techniques réexploitées durant les expérimentations #2 et #3 amènent à s'interroger sur les effets de la dispersion des données mis en exergue durant cette dernière expérimentation. Toutefois, les résultats obtenus pour le semi-régulier de points proportionnels confortent l'idée que synthétiser l'information de manière graphique, en s'appuyant sur les règles de sémiologie graphique et de cartographie, optimise la **synoptique de la construction cartographique.** Ainsi, la représentation proposée dans cette thèse répond aux besoins de repérer et de mémoriser la répartition spatiale de l'endommagement sans difficulté, en réduisant les erreurs d'interprétation quantitative et qualitative. Par ailleurs, notre représentation offre le meilleur compromis entre son efficacité réelle (capacités cognitives et sensorielles) et son efficacité perçue (capacité perceptive).

Bien évidemment, les forces et faiblesses de ces protocoles ont fait l'objet de discussions apportant un regard critique sur nos résultats et d'améliorer les expérimentations futures.

Notre cinquième contribution a concerné l'exploitation complète des capacités du semi-régulier de points proportionnels dans la création d'un modèle de représentation multi-échelle sous SIG et de son intégration dans des applications de géovisualisation au profit du laboratoire de recherche LAGAM et du bureau d'études RisCrises.

Le changement d'échelle est un concept clé en géographie. Dès lors, nous avons pleinement exploité les capacités de la représentation proposée en offrant une méthode d'analyse multi-échelle. Cette dernière est réalisée au moyen d'un emboitement successif de mailles dont les dimensions et les positions sont définies à partir des référentiels standardisés Web Mercator (ESPG : 3857) utilisés pour les échelles de visualisation web (Google Earth, Esri, Bing, etc.). Cette méthode a été réalisée sous SIG. Elle a par la suite été employée pour créer deux démonstrateurs web de cartographie interactive et dynamique qui avaient pour objectif de présenter les capacités de notre représentation à travers les échelles de zoom. Le premier démonstrateur web a été réalisé dans le cadre du projet ANR TIREX. Il fournit une carte interactive des conséquences du cyclone Irma (2017) à plusieurs échelles, du bassin caribéen jusqu'aux bâtiments endommagés sur l'île de Saint-Martin (partie française). Le second démonstrateur web a été réalisé dans le cadre des prestations du bureau d'études RisCrises. Il fournit un indicateur spatial du risque incendie des bâtiments visualisables à plusieurs échelles, du département du Gard jusqu'au bâtiment. Ces deux démonstrateurs ont en commun d'avoir été réalisés au moyen de logiciels libres et d'être facilement intégrable à toute interface web.

Notre sixième contribution a porté sur le cheminement de l'incertitude dans la cartographie des dommages *post*-catastrophes. Elle propose également une représentation spatiale de l'information lorsque des paramètres tels que le niveau de fiabilité du diagnostic, de qualité des images exploitées, etc. peuvent être pris en compte dans la conception des cartes.

Ces sources d'incertitudes sont introduites dès l'acquisition des images par les satellites, au traitement et à leur transformation sous forme d'informations thématiques, par les photo-interprètes et les cartographes, jusqu'aux phases de visualisation et d'interprétation par les utilisateurs. L'état de l'art et nos retours d'expériences de terrain ont souligné que l'incertitude s'installe dès le départ et dépend de critères techniques (mode d'acquisition, qualité des images, caractéristique de l'aléa, etc.) et subjectifs (choix du photo-interprète et du cartographe). L'incertitude est présente dans le rendu final, qu'est la carte, sans que l'utilisateur en soit conscient. Nos expérimentations ont montré que d'autres incertitudes s'y adjoignent, en lien avec les processus perceptifs et cognitifs individuels.

Nous avons tenté de qualifier et de quantifier une partie des variables qui définissent l'incertitude en proposant une représentation spatiale basée sur les différences attributaires présentent entre deux sources d'évaluation des dommages. Cette démarche, inscrite dans la continuité des travaux de recherche centrés sur ces problématiques (***Arnaud & Davoine, 2009a; Kunz, 2011; Kunz & Hurni, 2011; MacEachren et al., 2012; Merz et al., 2007; Pang, 2008; Thomson et al., 2005***), aboutit à une proposition fondée sur **les caractéristiques visuelles et symboliques du brouillard de guerre.**

Ainsi, les résultats de ce travail de thèse viennent enrichir les connaissances en sciences de l'information géographique et plus particulièrement, les usages de la cartographie dans le domaine des risques. Ces connaissances fournissent aux services de cartographies rapides un retour d'expérience inédit sur leurs

productions à l'échelle internationale et des leviers de conception cartographique. Cette thèse introduit également des possibilités graphiques pour l'intégration des incertitudes d'évaluation des dommages. En outre, les résultats obtenus par ce travail de thèse montrent l'intérêt d'une approche de conception cartographique fondée sur la prise en compte des règles de sémiologie graphique et sur des expérimentations plaçant l'utilisateur au centre de cette construction. En lien avec les missions du laboratoire LAGAM, ces méthodes seront utiles au développement de futurs supports de transfert des connaissances scientifiques. Vis-à-vis du bureau d'études RisCrises, cette thèse est à l'origine de la création de son pôle de Recherche & Développement (créé en 2018) qui se compose aujourd'hui deux docteurs et d'un géomaticien thématicien. Les méthodes développées dans cette thèse serviront notamment au développement d'un projet de géo-Indicateurs TErritorial des Risques Majeurs (ITERM) offrant ainsi des perspectives de valorisation de notre recherche. Cependant ce travail de thèse possède certaines limites qui questionnent les perspectives à donner à cette recherche.

Perspectives de recherche

- **<u>Élargir les travaux d'optimisation et d'expérimentation de la cartographie en gestion des risques</u>**

Les protocoles expérimentaux de cette thèse se sont principalement focalisés sur les techniques utilisées pour représenter les dommages. Il est donc envisagé de compléter ces premiers résultats par les différentes composantes qui ont été détaillées lors de l'analyse des signatures visuelles (cf. supra 5.3). Il s'agira alors d'approfondir les conséquences des fonds de carte, de la diversité des symboles, des couleurs, ou encore de la composition générale de la carte sur sa lecture et sur l'interprétation de son message final. Nous envisageons notamment d'analyser les contraintes sur les choix de couleur des éléments qui composent les éléments de premier plan et de second plan. L'objectif serait ici de préserver les relations de contrastes, mais également d'harmonie des cartes en utilisant les relations chromatiques par exemple. Ces perspectives de recherche sont autant d'ouvertures à différentes expérimentations qui permettront progressivement d'alimenter les réflexions déjà menées par les chercheurs dans ce domaine (***Brewer, 1994; Chesneau, 2006; Jégou, 2014; Konecny & Bandrova, 2006; Seipel & Lim, 2017; Staněk et al., 2010***).

Suite aux relations développées avec les membres de l'équipe ADVANSE du LIRMM et aux perspectives qui découlent de l'expérimentation #3, nous envisageons également d'approfondir les recherches sur l'analyse des données brutes issues de l'Eye-tracker. En effet, la stratégie de balayage d'une carte sert à capter les informations nécessaires à la réalisation d'une tâche. Lors de l'expérimentation #3 (cf. supra 10.2.2), nous n'avons pas pu exploiter les allers-retours entre la légende et la carte. Il est donc envisagé d'étudier ces effets au moyen d'une analyse exclusive des données récupérées par l'Eye-tracker sur l'emprise des légendes des cartes de cette expérimentation. La comparaison de ces données avec les taux de bonnes réponses et les temps de réponse des participants permettrait de savoir par exemple, si certaines techniques sont prédisposées à donner de bonnes réponses sans visionnage systématique de la légende (message esthétique). Par ailleurs, il existe aujourd'hui plusieurs outils de modélisation de la saillance visuelle d'une image, comme l'algorithme SUN (***Jégou & Deblonde, 2012***), qui pourraient appuyer les futurs protocoles d'expérimentation. Ces outils donnent un résumé sur la durée estimée de fixation de l'œil et permettent d'estimer la perception pré attentive de ce dernier avant qu'il n'effectue

des recherches conscientes. Ces résultats peuvent être reproduits à partir d'une carte, en intégrant auparavant les biais de fixation potentiellement engendrés lors de sa lecture (titre, légende, etc.) et qui diffèrent du visionnage classique d'une image. Ces résultats pourraient être comparés avec ceux estimés par les logiciels de capture oculaire afin d'estimer des niveaux de saillance *a priori* et *a posteriori*.

Les résultats des expérimentations montrent également que la perception des utilisateurs peut être influencée par l'esthétisme d'une carte. Toutefois, cette thèse n'offre qu'un avant-goût des véritables conséquences de cette variable dans l'intérêt et l'utilisabilité d'une carte. Les réflexions sur l'esthétisme doivent donc se poursuivre à travers d'autres expérimentations. Elles permettraient, par exemple, d'estimer les conséquences de l'esthétisme sur un jeu de cartes. La couleur, par exemple, est connue pour avoir d'importantes connotations culturelles et psychologiques (***Jégou, 2014***). Elle admet également un brouillage de l'interprétation cartographique (***Rimbert, 1973***) qui peut être basée sur des *a priori*. De la même manière, il serait intéressant de mesurer la différence d'interprétation entre une carte moins esthétique, mais correcte, et une carte plus esthétique, mais incorrecte. Ces expérimentations permettraient d'approfondir également l'impact de ces variables sur la lecture et l'intégration du message cartographique prédéterminé. Une autre possibilité serait de proposer à l'utilisateur de construire la carte par lui-même, à l'instar du travail réalisé par les étudiants du Master 1 GCRN (cf. supra 5.1.2). Cela permettrait d'analyser les choix cartographiques et les préférences utilisateurs en fonction des usagers métiers ou des niveaux cartographiques par exemple. Une interface dédiée proposerait à l'utilisateur de choisir des couches de dommages, des couleurs préprogrammées, etc., en utilisant des codes existants et des propositions optimisées. Si cette question de l'esthétisme semble encore peu exploitée en cartographie (***Krygier, 2015***), elle fait pourtant partie des objets d'étude de la sémiologie graphique. L'objectif final serait d'aboutir à un guide des bonnes pratiques qui servirait autant aux services de cartographies rapides qu'aux scientifiques.

- **<u>Poursuivre les recherches sur les modes de représentations de l'incertitude dans la cartographie</u>**

La représentation de l'incertitude proposée dans cette thèse n'a pour l'instant fait l'objet d'aucune expérimentation, étape qui est néanmoins importante pour conclure cette réflexion. En effet, si la métaphore visuelle du brouillard de guerre proposée ici emprunte de nombreux critères physiques et perceptifs de l'incertitude, on ne peut pas estimer son impact sur l'interprétation des lecteurs pour le moment. En outre, nous imaginons tester ce mode de représentation par rapport à d'autres méthodes de visualisation comme nous avons pu le faire pour notre proposition de visualisation des dommages.

En plus des expérimentations, cette technique peut être perfectionnée et standardisée à la fois sur SIG, mais également et surtout via les applications de géovisualisation web. Nous avons déjà entamé ce travail de géovisualisation des incertitudes avec des propositions graphiques initiées notamment dans les cartes de localisation des victimes liées aux aléas naturels en Guadeloupe (cf. supra 12.3.2). Par l'intermédiaire de ces outils, il serait alors possible d'informer l'utilisateur du niveau de fiabilité des données que représente la représentation du brouillard et d'y intégrer des informations complémentaires. Le projet UNIMAP par exemple intègre des niveaux d'incertitude attributaire (thermomètre) et spatiale (flou) qui sont complémentaires à l'incertitude générale (visualisée par une variation de teinte) (***Berjawi et al., 2014***). Des infos bulles qui apparaissent au passage de la souris sur l'une des zones en question pourraient par exemple être utilisées dans ce cas d'étude. Il serait envisageable d'actualiser cette

visualisation de l'incertitude au fur et à mesure de la mise à jour des données, soit par la remontée des relevés de terrain à travers la cartographie participative par exemple, soit par des processus de vérification entre photo-interprètes.

Perspectives de valorisation future des résultats de la thèse

- **La valorisation de la méthode de représentation multi-échelle dans le cadre des cartographies des dommages *post*-catastrophes**

Les objectifs fixés par cette thèse ont nécessité des discussions avec les organismes nationaux et internationaux intervenants dans le cadre de la cartographie des dommages *post*-catastrophes. Dès février 2019, des échanges se sont formalisés avec des membres du CNES en charge de la diffusion des solutions de la CHARTE et de Copernicus EMS, discussions au cours desquelles les démarches et les retombées de notre travail de recherche ont été présentées. Ces échanges ont par la suite initié un cadre de travail favorable à la valorisation des résultats de la thèse à destination de ces services à l'échelle nationale, mais également internationale, notamment par le biais d'une visioconférence, organisée à l'initiative du CNES, qui s'est tenue en avril 2019 afin de présenter nos travaux aux membres de *l'International Working Group on Satellite Emergency Mapping* (IWG-SEM). L'intervention du CNES, du SERTIT et du SIRS dans l'organisation de la seconde expérimentation (février 2020) a également contribué à renforcer les échanges autour de cette thèse et la valorisation future de certains résultats. Des échanges plus récents (juin 2021) avec ces acteurs ont permis d'une part de partager les résultats des différentes expérimentations visant à tester les capacités de notre représentation, mais également de présenter les deux démonstrateurs web développés dans le cadre du projet ANR TIREX, et celui du risque incendie dans le département du Gard. Cette présentation a débouché sur des perspectives de valorisation de nos résultats notamment avec la mise en place récente de cartographies web par Copernicus EMS[55]. Dans les mois à venir, un premier objectif serait d'approfondir les capacités de notre méthode à répondre aux objectifs de visualisation multi-échelle dans un contexte opérationnel. Des jeux de données mis à disposition par le CNES pourront être utilisés afin de tester notre méthode de représentation spatiale sur différents territoires et pour différents types d'évènements catastrophiques. Il s'agit également de pérenniser les échanges avec le SIRS et le SERTIT autour des besoins de continuité sémiologique et de cohérence spatiale dans la représentation cartographique des dommages à différentes échelles de zoom. Pour le bureau d'études RisCrises, les rapprochements opérés avec ces structures offrent de nombreuses perspectives de collaboration autour de la valorisation des données du spatial au service des stratégies régionales et locales d'adaptation aux risques climatiques, et dont les enjeux seront abordés au salon POLLUTEC 2021 sur le stand Connect by CNES.

[55] https://activations.emergency.copernicus.eu/

- **<u>Poursuivre le développement d'une représentation multi-échelle dédiée aux interfaces web à travers le projet « ITERM »</u>**

Nous avons vu dans la section 12.2.2 du chapitre 13 qu'au-delà des aspects liés à la cartographie rapide des dommages *post*-catastrophes, la méthode de représentation multi-échelle pouvait servir à d'autres applicatifs du domaine des risques. La création d'un indicateur du risque incendie des bâtiments à plusieurs échelles cartographiques a démontré les capacités de notre méthode semi-automatique à traiter un nombre important de données sur des temps relativement courts et à les visualiser sur une interface web. Cette méthode est en cours de développement dans cadre du projet de géo-Indicateurs TEritorial des Risques Majeurs (ITERM) que nous menons au sein du bureau d'études RisCrises (Figure 153). Ce dernier proposera une plateforme cartographique interactive dédiée à l'affichage de données sur la connaissance des risques sur le territoire français. Les géo-indicateurs pourront être construits sur la base des données disponibles à l'échelle nationale et sur la zone d'étude prédéfinie. Les données pourront être recueillies à partir de relevés de terrain ou satellitaires. En plus de traiter l'information à différents niveaux de mailles et de les représenter par l'intermédiaire du semi-régulier de points proportionnels, la plateforme fournira des outils de visualisation utiles aux différents utilisateurs de la plateforme (décideurs locaux, SDIS, etc.). En effet, il apparait intéressant et important de permettre à l'utilisateur de sélectionner le type d'emprise qu'il souhaite afficher. Il pourra alors interroger les données à l'échelle d'une emprise administrative (zone iris, communes, ensemble de communes, départements, région, etc.) ou bien sur une zone d'intérêt prédéfinie par lui-même (rectangle de sélection, emprise de la *bounding box*, etc.). Cela aura pour effet de modifier l'emprise des données affichées, à la fois cartographiques et statistiques. Par l'intermédiaire des mises à jour et de la temporalité des données, nous envisageons également des fonctionnalités permettant de suivre l'évolution temporelle des indicateurs affichés.

En nous appuyant sur les applicatifs déjà mis en place pour la défense extérieure contre les incendies (DECI), les premiers indicateurs développés dans le cadre de ce projet porteront sur les risques incendies (feux de forêt, urbain, parcelles agricoles). Il s'agira d'appuyer les SDIS, notamment dans le déploiement de leurs moyens durant les périodes sèches grâce à l'intégration des données satellitaires (à partir des indicateurs de biomasse et de sécheresse), et durant toute l'année pour ce qui est du risque incendie en zone urbaine (indicateur de la DECI). Par ailleurs, cet outil sera utile aux collectivités dans la mise en application des obligations légales de débroussaillement (OLD).

Afin de répondre à ces objectifs, un ingénieur en géomatique a été intégré à l'équipe du pôle R&D de RisCrises. Il sera accompagné à terme par un développeur web pour la réalisation de l'interface utilisateur. Une thèse CIFRE sera également envisagée dans la création des indicateurs spatiaux concernant le risque incendie.

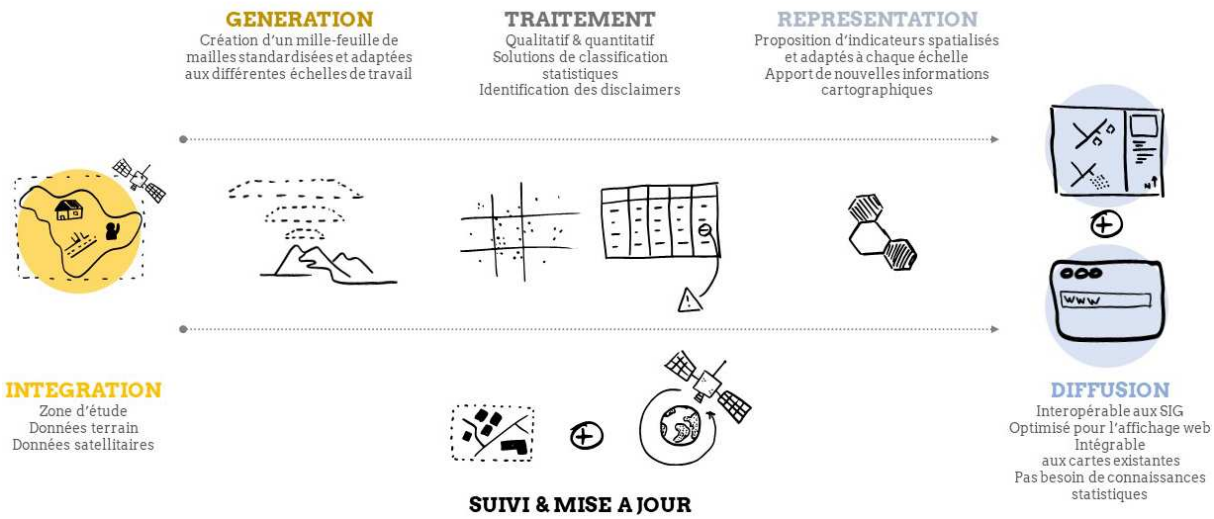


Figure 153 : Schéma de fonctionnement du géo-indicateur multi-échelle

- **<u>Proposer une solution d'information préventive par la cartographie interactive</u>**

La collaboration entre le laboratoire LAGAM et le bureau d'études donne lieu à d'autres perspectives, notamment la création de supports cartographiques numériques, interactifs et dynamiques, scénarisant des événements passés à l'instar de ce qui a été produit pour le projet ANR TIREX. Un projet de Recherche & Développement sous l'appellation « Scénarisques » est en cours d'élaboration afin de proposer des outils de géovisualisation web dans la diffusion d'une information préventive à destination des acteurs locaux et nationaux. Il est notamment motivé par les retours prometteurs et le prix public gagné par RisCrises lors des IRISES 2021 sur la thématique de l'information préventive.

Les mois à venir permettront de valoriser un retour d'expérience cette fois-ci métropolitain, en intégrant des informations relatives à l'événement survenu dans les Alpes Maritimes en 2020. Pour cela, nous mobiliserons les données récoltées par une étudiante de master 1 GCRN dont la mission, menée en collaboration avec RisCrises et le LAGAM, a été d'étudier les conséquences géomorphologiques et structurelles de la catastrophe et d'analyser la gestion de la crise des communes de la vallée de la Vésubie. Les données seront intégrées à une première ébauche de carte « Scénarisques » et valorisées dans un article portant sur la géovisualisation multi site des conséquences de la catastrophe sur des territoires de montagne enclavés.

- **<u>Proposition d'un laboratoire commun autour du développement d'une cartographie numérique au service de la gestion et de la prévention du risque tsunami en France</u>**

TSUNAMI Lab est un projet de laboratoire commun (déposé en septembre 2021 et pour une durée de 4 ans) qui associe le LAGAM et RisCrises autour d'un programme ambitieux de recherche et d'innovation dans les domaines de la géovisualisation et du numérique appliqués à la prévention et la gestion du risque tsunami en France métropolitaine et d'Outre-mer. Il répond à un important besoin national mis en exergue par deux rapports sénatoriaux (***Courteau, 2007, 2019***), largement identifié par les deux partenaires de ce projet, à savoir : aider les acteurs des communes littorales à préparer la mise en sécurité des personnes en cas de tsunami, dans le cadre des systèmes d'alerte en cours de déploiement.

Pour répondre à ces besoins, ce Labcom propose la construction d'**une plateforme web ouverte et interactive qui centralisera la connaissance sur le risque tsunami et proposera des outils innovants de prévention et de préparation à la gestion de crise tsunami.** L'architecture de cette plateforme se dessinera autour des cinq modules complémentaires : quantifier et cartographier le risque, préparer les territoires, informer les citoyens, former les acteurs et valoriser les stratégies locales de prévention. La réalisation des modules cartographiques mobilisera les résultats de notre recherche afin de proposer un géo-indicateur territorial multiscalaire de risque et de scénarios de crise intégrant de multiples variables (aléa, enjeux, accessibilité, etc.).

Au-delà du risque tsunami, le développement de cette plateforme sera réfléchi afin d"intégrer de nouveaux risques (inondation, feux de forêt, etc.) pérennisant ainsi la collaboration entre le LAGAM et RisCrises.

Bibliographie

Abdelbery, S., Bonin, O., Josselin, D., & Altman, E. (2014). *Propositions pour une cartographie sonore, synesthésique et interactive*. 15.

Adriano, B., Yokoya, N., Xia, J., Miura, H., Liu, W., Matsuoka, M., & Koshimura, S. (2021). Learning from multimodal and multitemporal earth observation data for building damage mapping. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *175*, 132-143.

Adrot, A. (2017). Dynamiques émergentes, matérialité et transmission d'information dans les organisations mises en difficulté : L'étude d'un réseau inter-organisationnel entre 2003 et 2013. *Revue COSSI: communication, organisation, société du savoir et information*, *2017*(2).

Agumya, A., & Hunter, G. J. (2002). Responding to the consequences of uncertainty in geographical data. *International Journal of Geographical Information Science*, *16*(5), 405-417.

Akella, M. K. (2009). First responders and crisis map symbols : Clarifying communication. *Cartography and Geographic Information Science*, *36*(1), 19-28.

Altan, O., Backhaus, R., Boccardo, P., & Zlatanova, S. (2010). *Geoinformation for disaster and risk management : Examples and best practices*. Joint Board of Geospatial Information Societies-United Nations Office for Outer Space Affairs.

Ancelin, J., Odoux, J. F., Schmit, O., & Caille, A. (2016). [I] Géo-Poppy [/i], un serveur web SIG portable pour le recueil de données terrain. *Géomatique Expert*, *109*, 42-48.

Andre, G., Chiroiu, L., & Guillande, R. (s. d.). *Evaluation et cartographie de dommages par imagerie satellitaire spot 5 : Simulation sur la ville de Bhuj, séisme de gujarat, inde (26 janvier 2001)*. 10.

André, G., Chiroiu, L., Guillande, R., & Galaup, M. (2001). *Evaluation et cartographie de dommages par imagerie satellitaire SPOT-5 : Simulation sur la ville de Bhuj, séisme de Gujarat, Inde (26 janvier 2001)*. 9.

Andrienko, N., & Andrienko, G. (2006). *Exploratory analysis of spatial and temporal data : A systematic approach*. Springer Science & Business Media.

Andrienko, N., & Andrienko, G. (2007). Intelligent visualisation and information presentation for civil crisis management. *Transactions in GIS*, *11*(6), 889-909.

Andrieu, D. (2014). Les cartogrammes, une séquence d'enseignement de la sémiologie à la géographie. *Cartes & Géomatique*, *222*.

Antoni, J.-P., Klein, O., & Moisy, S. (2004). Cartographie interactive et multimédia : Vers une aide à la réflexion géographique. *Cybergeo : European Journal of Geography*. https://doi.org/10.4000/cybergeo.2621

Arciniegas, G. A., Bijker, W., Kerle, N., & Tolpekin, V. A. (2007). Coherence- and Amplitude-Based Analysis of Seismogenic Damage in Bam, Iran, Using ENVISAT ASAR Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *45*(6), 1571-1581. https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.883149

Arnaud, A. (2020). Cartes et cartographie des ressentis et représentations d'individus : État des lieux, questions sémantiques et méthodologiques. *Mappemonde. Revue trimestrielle sur l'image géographique et les formes du territoire*, *129*.

Arnaud, A., & Davoine, P.-A. (2009a). Approche cartographique et géovisualisation pour la représentation de l'incertitude. *SAGEO*, 12.

Arnaud, A., & Davoine, P.-A. (2009b). Cartographie des temporalités dans le domaine des risques. *Comité Français de Cartographie*, *202*, 59-70.

Arnaud, P. (1990). L'origine, la date de rédaction et la diffusion de l'archétype de la Table de Peutinger. *Bulletin de la Société nationale des antiquaires de France*, *1988*(1), 302-321.

Arnheim, R. (1976). The perception of maps. *The American Cartographer*, *3*(1), 5-10.

Baddeley, A. (1992). Working memory. *Science*, *255*(5044), 556-559.

Bagot, J.-D. (1999). *Information, sensation et perception* (Vol. 1). A. Colin.

Bailly, A., & Scariati, R. (1999). *Voyage en géographie, Paris*. Economica.

Banos, A. (2001). A propos de l'analyse spatiale exploratoire des données. *Cybergeo: European Journal of Geography*.

Barbarino, N. (2005). *De la qualité de vie au diagnostic urbain, vers une nouvelle méthode d'évaluation : Le cas de la ville de Lyon* [These de doctorat Géographie, Aménagment et Urbanisme]. Université Lyon 2.

Barrière, P. (1943). Lignes de terre et lignes d'eau d'après la Table de Peutinger. *Revue des Études Anciennes*, *45*(1), 91-105.

Barroca, B., Pottier, N., & Lefort, E. (2005). Analyse et évaluation de la vulnérabilité aux inondations du bassin de l'Orge aval. *Septièmes Rencontres de Théo Quant*, *12*.

Bartram, D. (1980). Comprehending spatial information : The relative efficiency of different methods of presenting information about bus routes. *Journal of Applied Psychology*, *65*(1), 103.

Bastin, L., Buchanan, G., Beresford, A., Pekel, J.-F., & Dubois, G. (2013). Open-source mapping and services for Web-based land-cover validation. *Ecological Informatics*, *14*, 9-16.

Battiston, S., Clandillon, S., Faivre, R., Tinel, C., & Wania, A. (2019). L'utilisation des services cartographiques numériques d'urgence par satellite à des fins de sécurité intérieure. *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, *94*(2), 66-73. Cairn.info.

Béguin, M., & Pumain, D. (1994). *La représentation des données géographiques : Statistique et cartographie* (Vol. 1-192).

Benitez, F. (2019). La catastrophe de la Montagne Pelée le 8 mai 1902 en Martinique : Saint-Pierre, une ville résiliente ou un exemple archétypal de bifurcation. *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, *Volume 14*, 227-252.

Berjawi, B., Duchateau, F., Chesneau, É., Favetta, F., Seccia, G., Cunty, C., Miquel, M., & Laurini, R. (2014). Uncertainty visualization of multi-providers cartographic integration. *Journal of Visual Languages & Computing*, *25*(6), 995-1002.

Berke, P. R., Kartez, J., & Wenger, D. (1993). Recovery after disaster : Achieving sustainable development, mitigation and equity. *Disasters*, *17*(2), 93-109.

Bertin, J. (1967). *Sémiologie graphique, Les diagrammes, Les réseaux, Les cartes. Sémiologie graphique, Les diagrammes, Les réseaux, Les cartes* (Gauthiers-Villars).

Bertin, J. (1972). La cartographie et l'extrapolation de l'information. *Cahiers ORSTOM. Série Sciences Humaines*, *9*(2), 247-250.

Bertin, J. (1977). La graphique et le traitement graphique de l'information. *Nouvelle Bibliothèque Scientifique*.

Bertin, J. (2005). La représentation et l'étude visuelles des informations : Jacques Bertin, Sémiologie graphique. *Sémiologie graphique, Les diagrammes–Les réseaux–Les cartes*, 5-14.

Bessadok, F. (2015). *Modèle pour l'évaluation et l'amélioration de la lisibilité d'une carte géographique* [These de doctorat en Sciences de l'information et de la communication, Université Paris-Est]. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01233405

Bessis, J.-L., Bequignon, J., & Mahmood, A. (2004). The international charter "space and major disasters" initiative. *Acta Astronautica*, *54*(3), 183-190.

Bianchin, A. (2012). *Actualité de l'approche de Jacques Bertin dans l'enseignement de la cartographie*. *212*, 8.

Bigley, G. A., & Roberts, K. H. (2001). The incident command system : High-reliability organizing for complex and volatile task environments. *Academy of Management Journal*, *44*(6), 1281-1299.

Birch, C. P., Oom, S. P., & Beecham, J. A. (2007). Rectangular and hexagonal grids used for observation, experiment and simulation in ecology. *Ecological modelling*, *206*(3-4), 347-359.

Blondel, J., & Ferris, R. (1995). *Biogéographie : Approche écologique et évolutive*. Masson Paris.

Board, C. (1967). *Maps as models. In, RJ Chorley & P. Haggett (eds.), Models in Geography*. 671-725.

Board, C., & Taylor, R. (1977). Perception and maps : Human factors in map design and interpretation. *Transactions of the institute of british geographers*, 19-36.

Boorstin, D. (1986). *Les découvreurs : D'Hérodote à Copernic, de christophe Colomb à Einstein, l'aventure de ces hommes qui inventèrent le monde*. Seghers.

Bord, J.-P. (2012). *L'univers des cartes. La carte et le cartographe*. Belin.

Boroditsky, L. (2000). Metaphoric structuring : Understanding time through spatial metaphors. *Cognition*, *75*(1), 1-28.

Brewer, C. A. (1994). *Guidelines for use of the perceptual dimensions of color for mapping and visualization*. *2171*, 54-63.

Broadbent, D. (1958). *Perception and Communication. Perception and communication*. Elsevier.

Brodlie, K., Osorio, R. A., & Lopes, A. (2012). A review of uncertainty in data visualization. In *Expanding the frontiers of visual analytics and visualization* (p. 81-109). Springer.

Brunner, D., Lemoine, G., & Bruzzone, L. (2010). Earthquake Damage Assessment of Buildings Using VHR Optical and SAR Imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *48*(5), 2403-2420. https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2038274

Burkhard, R. A., & Meier, M. (2005). Tube Map Visualization : Evaluation of a Novel Knowledge Visualization Application for the Transfer of Knowledge in Long-Term Projects. *J. UCS*, *11*(4), 473-494.

Buttenfield, B. P., & Ganter, J. H. (1990). *Visualization and GIS: What should we see ? What might we miss*. *1*, 307-316.

Buttenfield, B. P., & McMaster, R. B. (1991). *Map Generalization : Making rules for knowledge representation*. Longman Scientific & Technical London.

Cai, G., Sharma, R., MacEachren, A. M., & Brewer, I. (2006). Human-GIS interaction issues in crisis response. *International Journal of Risk Assessment and Management*, *6*(4-6), 388-407.

Caloz, R., & Collet, C. (2011). *Analyse spatiale de l'information géographique*. PPUR Presses polytechniques.

Candela, T., Péroche, M., Leone, F., & Robustelli, M. (sous presse). Cartographier un territoire « cycloné » : Saint-Martin après le passage de l'ouragan Irma (Antilles du Nord, sept. 2017), In Press. *Mappemonde. Revue trimestrielle sur l'image géographique et les formes du territoire*, 24.

Caron, C., & Roche, S. (2001). Vers une typologie des représentations spatiales. *L'Espace geographique*, *30*(1), 1-12.

Carr, D. B., Olsen, A. R., & White, D. (1992). Hexagon mosaic maps for display of univariate and bivariate geographical data. *Cartography and Geographic Information Systems*, *19*(4), 228-236.

Castner, H. W., & Eastman, R. J. (1985). Eye-movement parameters and perceived map complexity—II. *The American Cartographer*, *12*(1), 29-40.

Cauvin, C., Escobar, F., & Serradj, A. (2007). *Cartographie thématique 1–Une nouvelle démarche*. Hermès-Lavoisier.

Cecconi, C. (2007). L'essor du papier électronique. *Le Monde des cartes*, *193*, 51-56.

Cécé, R., Bernard, D., Krien, Y., Leone, F., Candela, T., Péroche, M., Biabiany, E., Arnaud, G., Belmadani, A., & Palany, P. (2021). A 30 m scale modeling of extreme gusts during Hurricane Irma (2017) landfall on very small mountainous islands in the Lesser Antilles. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *21*(1), 129-145.

Čerba, O., Jedlička, K., Čada, V., & Charvát, K. (2017). Centrality as a method for the evaluation of semantic resources for disaster risk reduction. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *6*(8), 237.

Chance, H., & Noury, M. (2011). La gestion de la post-catastrophe : L'approche française et la stratégie internationale. *Les dossiers de l'Institut des Risques Majeurs*, 135.

Charre, J. (2000). Quantitatif, qualitatif et informel en information géographique. *L'Espace géographique*, 273-278.

Chatfield, C. (1983). *Statistics for technology : A course in applied statistics* (3e éd., Vol. 3). CHAPMAN & HALL/CRC Press.

Chauvin, S. (2005). *Visualisations heuristiques pour la recherche et l'exploration de données dynamiques : L'art informationnel en tant que révélateur de sens* [Doctoral dissertation]. Université Paris VIII.

Chen, R., & Xie, J. (2008). Open source databases and their spatial extensions. In *Open source approaches in spatial data handling* (p. 105-129). Springer.

Chesneau, E. (2006). Modèle d'amélioration automatique des contrastes de couleurs en cartographie-Application aux cartes de risque. *Université de Marne-la-Vallée, Marne-la-Vallée*.

Chesneau, E., & Clément, A. (2013). Retour d'expérience sur la cartographie interactive du Document d'Information Communal sur les Risques Majeurs de la Ville de Saint-Étienne. *Géocarrefour*, *88*(4), 317-331.

Chesneau, E., & Ultsch, J. (2010). Cartographie et dimension historique dans le cadre de l'information préventive du risque majeur d'inondation : Des outils et des réflexions au service de la résilience. *Actes de Conférences EJC2010*.

Chételat, J. (2009). La figuration cartographique de l'espace sonore. *Images Re-vues. Histoire, anthropologie et théorie de l'art*, *7*, Article 7. http://journals.openedition.org/imagesrevues/437

Christinger, R. (1965). Notions préliminaires d'une géographie mythique. *Le Globe. Revue genevoise de géographie*, *105*(1), 119-159.

Christophe, S. (2012). *Cartographic Styles between traditional and original (towards a cartographic style model)*. 16-18.

Chung, J., & Wark, S. (2016). *Visualising uncertainty for decision support* (p. 62). Defence Science and Technology Group Fishermans Bend Victoria Australia.

Clausewitz, C. von. (1955). De la guerre.(traduction par Denise Naville). *Les Éditions de Minuit, Paris*.

Claval, P. (2008). Espace et territoire.Les bifurcations de la science régionale. *Géographie, économie, société*, *10*(2), 157-184. Cairn.info. https://doi.org/10.3166/ges.10.157-184

Clozier, R. (1972). *Histoire de la géographie*. FeniXX.

Clutton, A. (1983). On the nature of thematic maps and their history. *The Map Collector,(22)*, 42-43.

Coburn, A. W., Spence, R. J., & Pomonis, A. (1992). *Factors determining human casualty levels in earthquakes : Mortality prediction in building collapse*. *10*, 5989-5994.

Çöltekin, A. (2015). *Mix well before use : Understanding the key ingredients of user studies*. 3.

Çöltekin, A., Fabrikant, S. I., & Lacayo, M. (2010). Exploring the efficiency of users' visual analytics strategies based on sequence analysis of eye movement recordings. *International journal of geographical information science*, *24*(10), 1559-1575.

Comfort, L. K., Boin, A., & Demchak, C. C. (2010). *Designing resilience : Preparing for extreme events*. University of Pittsburgh Pre.

Cooner, A. J., Shao, Y., & Campbell, J. B. (2016). Detection of urban damage using remote sensing and machine learning algorithms : Revisiting the 2010 Haiti earthquake. *Remote Sensing*, *8*(10), 868.

COPERNICUS EMSR. (2018). *"EMSN 049—Reconstruction monitoring of St Martin and St Barthélemy islands (post IRMA)"* (Technical report N° 01; p. 62). European Commission Joint Research Centre.

Cornélis, B., & Billen, R. (2001). La cartographie des risques et les risques de la cartographie. *Risque et systèmes complexes: les enjeux de la communication*, 207-222.

Couche, J.-B. (2018). *À travers le brouillard de guerre* [Mémoire master 2]. Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne.

Courteau, R. (2007). *L'évaluation et la prévention du risque tsunami sur les côtes françaises en métropole et outre-mer* (Rapport pour l'office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques N° 488; p. 168).

Courteau, R. (2019). *La prévention et l'alerte du risque de tsunami sur les côtes françaises* (Rapport pour l'office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques N° 1792; p. 64).

Crampton, J. W. (2001). Maps as social constructions : Power, communication and visualization. *Progress in human Geography*, *25*(2), 235-252.

Crampton, J. W. (2011). *Mapping : A critical introduction to cartography and GIS* (Vol. 11). John Wiley & Sons.

Crampton, J. W., Graham, M., Poorthuis, A., Shelton, T., Stephens, M., Wilson, M. W., & Zook, M. (2013). Beyond the geotag : Situating 'big data'and leveraging the potential of the geoweb. *Cartography and geographic information science*, *40*(2), 130-139.

Croisile, B. (2009). Approche neurocognitive de la mémoire. *Gérontologie et société*, *32*(3), 11-29.

Crosetto, M., Ruiz, J. A. M., & Crippa, B. (2001). Uncertainty propagation in models driven by remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, *76*(3), 373-385.

Cuenin, R. (1972). *Cartographie générale : Tome 1 : Notions générales et principes d'élaboration*. Ed. Eyrolles.

Cunty, C., Mathian, H., & Cartomouv, G. (2017). Les pratiques de cartographie animée pour représenter le changement. *Mappemonde. Revue trimestrielle sur l'image géographique et les formes du territoire*, *120*, Article 120. https://doi.org/10.4000/mappemonde.2602

Dauphiné, A. (2001). Risques et Catastrophes : Observer-Spatialiser, Comparer-Comprendre. *Armand Colin Éditeur*, *21*, 288.

Dauphiné, A., & Provitolo, D. (2007). *La résilience : Un concept pour la gestion des risques*. *2*, 115-125.

de Blomac, F. (1994). *ARC/INFO: concepts et applications en géomatique*. Hermès.

de Boissezon, H., & Dubois, C. (2014). Les données de télédétection dans la gestion des risques et des désastres en Haïti : La difficile rencontre entre expertise exogène et savoirs locaux. *CIST2014 - Fronts et frontières des sciences du territoire*, 135-140. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01353460

Decrop, G. (1997). *De l'expertise scientifique au risque négocié. Le cas du risque en montagne*. Editions Quae.

de Fortia d'Urban, M. (1845). *Recueil des itinéraires anciens comprenant l'Itinéraire d'Antonin, la Table de Peutinger et un choix des périples grecs : Avec dix cartes dressées par le colonel Lapie*. Imp. Royal.

Defossez, S., & Gherardi, M. (2020). Face au cyclone Irma!. Le rôle des populations dans la gestion de la crise à Saint-Martin (Petites Antilles, îles du Nord). *EchoGéo*.

Defossez, S., Vinet, F., & Leone, F. (2018). *Diagnostiquer la vulnérabilité face aux inondations : Progrès et limites*.

Deitrick, S. A. (2007). *Uncertainty visualization and decision making : Does visualizing uncertain information change decisions*. 4-10.

de La Blache, P. V. (1903). *Tableau de la Géographie de la France par P [aul] Vidal de la Blache, prof. À Paris*. Hachette & Cie.

Dell'Acqua, F., & Gamba, P. (2012). Remote sensing and earthquake damage assessment : Experiences, limits, and perspectives. *Proceedings of the IEEE*, *100*(10), 2876-2890.

Dent, B. D., Torguson, J., & Hodler, T. (1993). Cartography : Thematic map design. Dubuque : Wm. C. *C. Brown Geographic Designs*.

d'Ercole, R. (1991). *Vulnérabilité des populations face au risque volcanique : Le cas de la région du volcan Cotopaxi (Equateur)* [These de doctorat en Géographie]. Université Joseph Fourier - Grenoble.

d'Ercole, R., Hardy, S., Metzger, P., Robert, J., & Gluski, P. (2012). Les dimensions spatiales et territoriales de la gestion de crise à Lima. *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement*, *12*(1).

d'Ercole, R., & Metzger, P. (2009). La vulnérabilité territoriale : Une nouvelle approche des risques en milieu urbain. *Cybergeo: European Journal of Geography*, *447*, 87-96.

d'Ercole, R., & Pigeon, P. (1999). *L'expertise internationale des risques dits naturels : Intérêt géographique*.

d'Ercole, R., & Rançon, J.-P. (1994). *La future éruption de la Montagne Pelée : Risque et représentations*.

d'Ercole, R., Thouret, J.-C., Aste, J.-P., Dollfus, O., & Gupta, A. (1995). *Croissance urbaine et risques naturels : Présentation introductive*.

de Richemond, N. M., & Reghezza, M. (2010). *La gestion du risque en France : Contre ou avec le territoire? 3*, 248-267.

DeSanctis, G., & Gallupe, R. B. (1987). A Foundation for the Study of Group Decision Support Systems. *Management Science*, *33*(5), 589-609. https://doi.org/10.1287/mnsc.33.5.589

de Sède-Marceau, M.-H., & Moine, A. (2001). Systémique et bases de données territoriales. Des concepts et des outils pour une gestion raisonnée des territoires. *Revue internationale de géomatique*, *11*(3-4), 333-358.

Desfachelles, O. (2015). Permanence et dépassement des concepts de friction et de brouillard : Le paradigme clausewitzien et la guerre civile américaine (1861-1865). *Strategique*, *3*, 15-30.

Desportes, V., & Cuche, B. (2007). *Décider dans l'incertitude* (2e éd.). Economica.

Dhee, F. (2013). *Amélioration de la carte topographique pour les daltoniens* [These de doctorat en Géographie]. Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne.

Di Méo, G. (1998). *Géographie sociale et territoires*. Nathan.

Dodge, M. (2014). 24 Mapping and Geovisualization. *Approaches to human geography: Philosophies, theories, people and practices*, 289.

Donnay, J.-P. (2000). Les spatiocartes en composition colorée. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, *38*(1), 43-61.

Donze, J. (2007). Le risque : De la recherche à la gestion territorialisée. *Géocarrefour*, *82*(1-2), 3-5.

Dorling, D., & Fairbairn, D. (2013). *Mapping : Ways of representing the world*. Routledge.

Douvinet, J., Defossez, S., Anselle, A., & Denolle, A.-S. (2011). Les maires face aux plans de prévention du risque inondation (Ppri). *L'Espace géographique*, *40*(1), 31-46. Cairn.info. https://doi.org/10.3917/eg.401.0031

Douvinet, J., Kouadio, J., Bonnet, E., & Gensel, J. (2017). 15—Crowdsourcing and Crisis-Mapping in the Event of Floods : Tools and Challenges. In F. Vinet (Éd.), *Floods* (p. 209-223). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-269-4.50015-9

Douvinet, J., Pallares, R., Genre-Grandpierre, C., Gralepois, M., Rode, S., & Servain-Courant, S. (2013). L'information sur les risques majeurs à l'échelle communale. Occurrence et facteurs explicatifs du DICRIM, un outil préventif sous-utilisé. *Cybergeo: European Journal of Geography*.

Drecki, I. (2002). Visualisation of uncertainty in geographical data. *Spatial data quality*, 140-159.

Dubois, E. (2017). Éloge de l'incertitude. *Revue Defense Nationale*, *8*, 56-60.

Duckham, M., Mason, K., Stell, J., & Worboys, M. (2001). A formal approach to imperfection in geographic information. *Computers, environment and urban systems*, *25*(1), 89-103.

Dutozia, J., Emsellem, K., & Voiron, C. (2014). *Théorie des ensembles flous et science géographique : Trois champs d'application, des pistes de convergence*. 33-41.

Duvat, V., Pillet, V., Volto, N., Krien, Y., Cécé, R., & Bernard, D. (2019). High human influence on beach response to tropical cyclones in small islands : Saint-Martin Island, Lesser Antilles. *Geomorphology*, *325*, 70-91. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.09.029

Dymon, U. J. (2003). An analysis of emergency map symbology. *International Journal of Emergency Management*, *1*(3), 227-237.

Eberhard, M. O., Baldridge, S., Marshall, J., Mooney, W., & Rix, G. J. (2010). *The MW 7.0 Haiti Earthquake of January 12, 2010 : USGS/EERI Advance Reconnaissance Team Report* (Report N° 2010-1048; Open-File Report). USGS Publications Warehouse. https://doi.org/10.3133/ofr20101048

Eckert, M. (1921). *Die kartenwissenschaft : Forschungen und grundlagen zu einer kartographie als wissenschaft* (Vol. 1). W. de Gruyter.

Eguchi, R. T., Huyck, C. K., Ghosh, S., Adams, B. J., & McMillan, A. (2009). Utilizing new technologies in managing hazards and disasters. In *Geospatial Techniques in Urban Hazard and Disaster Analysis* (p. 295-323). Springer.

Elwood, S. (2009). Geographic Information Science : New geovisualization technologies—Emerging questions and linkages with GIScience research. *Progress in human geography*, *33*(2), 256-263.

Fabrikant, S. I., Hespanha, S. R., & Hegarty, M. (2010). Cognitively inspired and perceptually salient graphic displays for efficient spatial inference making. *Annals of the Association of american Geographers*, *100*(1), 13-29.

Fabrikant, S. I., Rebich, S., Montello, D. R., Andrienko, G., & Andrienko, N. (2008). A visual analytics approach to evaluate inference affordance from animated map displays. *GISciene 2008 - Fifth International Conference on Geographic Information Science : pre-conference workshop on Geospatial Visual Analytics*, 7.

Fairbairn, D. (2006). Measuring map complexity. *The Cartographic Journal*, *43*(3), 224-238.

Farmer, R. (1977). Today's risks : Thinking the unthinkable. *Nature*, *267*(5607), 92-93.

Faugères, L. (1990). Géographie physique et risques naturels (Physical geography and natural hazards). *Bulletin de l'Association de géographes français*, *67*(2), 89-98.

Faugères, L. (1991). La géo-cindynique, géo-science du risque (Geo-cindynics, a science of risk management). *Bulletin de l'Association de Géographes français*, *68*(3), 179-193.

Fauteux, M. (1977). Représentation de la ville. *Cahiers de géographie du Québec*, *21*(52), 83-103.

Favre-Brun, A. (2013). *Architecture virtuelle et représentation de l'incertitude : Analyse de solutions de visualisation de la représentation 3D: Application à l'église de la chartreuse de Villeneuve lez Avignon (Gard) et à l'abbaye de Saint-Michel de Cuxa (Pyrénées-Orientales)* [These de doctorat en Archéologie]. Université Aix-Marseille.

Feick, R., & Robertson, C. (2015). A multi-scale approach to exploring urban places in geotagged photographs. *Computers, Environment and Urban Systems*, *53*, 96-109.

Flannery, J. J. (1971). The relative effectiveness of some common graduated point symbols in the presentation of quantitative data. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, *8*(2), 96-109.

Flichy, P. (1995). *Une histoire de la communication moderne*. La découverte.

Forgues, B. (1993). *Processus de décision en situation de crise* [These de doctorat en Sciences de gestion]. Université Pierre Mendès Grenoble 2.

Forriez, M. (2010). *Caractérisation formelle des structures multi-échelles géographiques en relativité d'échelle : Exemples en géographie physique, géographie urbaine, géohistoire et géographie du peuplement* [These de doctorat en Géographie]. Université Avignon.

Fusco, G., Emsellem, K., & Douvinet, J. (2013). L'incertitude dans les sciences géographiques. Spécificités, schémas d'appréhension. *L'incertitude: regards pluridisciplinaires*, 23.

Gaffuri, J. (2008). *Généralisation automatique pour la prise en compte de thèmes champ : Le modèle GAEL* [These de doctorat en Sciences de l'information géographique]. Université Paris-Est.

Gaffuri, J. (2011). Improving web mapping with generalization. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, *46*(2), 83-91.

Gage, J. (1999). *Color and meaning : Art, science, and symbolism*. Univ of California Press.

Gahegan, M., & Ehlers, M. (2000). A framework for the modelling of uncertainty between remote sensing and geographic information systems. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *55*(3), 176-188.

Garry, G. (1996). Cartographie et prévention des risques naturels en France. *Comité Français de Cartographie*, *146*(147), 129-147.

Gaver, W. W. (1986). Auditory icons : Using sound in computer interfaces. *Human-computer interaction*, *2*(2), 167-177.

Georges-Yves, K., & Rubise, P. (1991). L'Archipel du danger. Introduction aux cindyniques. *Economica CPE, Paris*.

Gershon, N. (1998). Visualization of an imperfect world. *IEEE Computer Graphics and Applications*, *18*(4), 43-45.

Girard, M.-C., & Girard, C.-M. (2010). *Traitement des données de télédétection - 2e éd. : Environnement et ressources naturelles*. Dunod.

Giroux, M. D. C. (2012). La cartographie de crise : Le phénomène et son utilité. *Humanitaire. Enjeux, pratiques, débats*, *32*.

Girres, J.-F., Leone, F., Péroche, M., Gustave, G., & Gherardi, M. (2018). Analysis of tsunami evacuation maps for a consensual symbolization rules proposal. *International Journal of Cartography*, *4*(1), 4-24. https://doi.org/10.1080/23729333.2018.1440711

Givone, P. (1998). Risques naturels et transcriptions cartographiques. *Ingénierie-EAT, numéro spécial Risques naturels*.

Goldberg, J. H., & Kotval, X. P. (1999). Computer interface evaluation using eye movements : Methods and constructs. *International journal of industrial ergonomics*, *24*(6), 631-645.

Gollier, C. (2019). *Le climat après la fin du mois*. Presses Universitaires de France.

Gonod, P. (1996). *Dynamique des systèmes et méthodes prospectives*. Futuribles international.

Gorry, G. A., & Scott Morton, M. S. (1971). *A framework for management information systems*. Sloan school working paper 458-70.

Grandjean, G. (2018). Quel lieu pour l'exploration ? Approche formelle d'une incertitude spatialisée. *Colloque, Entre le jeu et le joueur : écarts et médiations*. Entre le jeu et le joueur : écarts et médiations, Liège.

Griffin, A. L., & Fabrikant, S. I. (2012). More maps, more users, more devices means more cartographic challenges. *Cartographic Journal*, *49*(4), 298-301.

Gros-Désormeaux, J.-R. (2012). La biodiversité dans des territoires insulaires, approche théorique et perspectives de développement. *Développement durable et territoires*, *Vol. 3, n° 1*. https://doi.org/10.4000/developpementdurable.9241

Grünewald, F. (2010). Les enseignements de la catastrophe. *Humanitaire. Enjeux, pratiques, débats*, *27*, Article 27. http://journals.openedition.org/humanitaire/892

Grünewald, F., & Renaudin, B. (2010). *Etude en temps réel de la gestion de la crise en Haïti après le séisme du 12 janvier 2010*. 74.

Grünthal, G. (1998). *European macroseismic scale 1998*. European Seismological Commission (ESC).

Gueben-Venière, S. (2019). *Il est temps de cartographier les crises*. 17.

Guelke, L. (1979). Perception, meaning and cartographic design. *The Canadian cartographer Toronto*, *16*(1).

Hallisey, E. J. (2005). Cartographic visualization : An assessment and epistemological review. *The Professional Geographer*, *57*(3), 350-364.

Hardy, S. (2011). Gestion des risques, gestion des situations d'urgence à La Paz : Base de données et cartographie d'aide à la décision. *Revue du Comité Français de Cartographie*, *207*, 49-62.

Harrower, M., & Brewer, C. A. (2003). ColorBrewer. Org : An online tool for selecting colour schemes for maps. *The Cartographic Journal*, *40*(1), 27-37.

Hermann, C. F. (1963). Some consequences of crisis which limit the viability of organizations. *Administrative science quarterly*, 61-82.

Hernandez, J. (2010). *ReNew Orleans? : Résilience urbaine, mobilisation civique et création d'un «capital de reconstruction» à la Nouvelle-Orléans après Katrina* [These de doctorat en Géographie]. Université Paris 10.

Hey, A., & Bill, R. (2014). Placing dots in dot maps. *International Journal of Geographical Information Science*, *28*(12), 2417-2434.

Hoarau, C., Touya, G., & Christophe, S. (2018). *MapMuxing : Multiplexing cartographique pour la gestion de crise*. 7ème Journée VISU.

Hunter, G. J., & Goodchild, M. (1993). *Managing uncertainty in spatial databases : Putting theory into practice*. 15-15.

Imbert, M. (1988). La vision naturelle. Le traitement neuronal de l'information visuelle. *Intellectica*, *5*(1), 3-31.

Ishihara, S. (1918). Tests for color blindness. *American Journal of Ophthalmology*, *1*(5), 376.

Itami, R. M., & Raulings, R. J. (1993). *SAGE Introductory Guidebook*. Digital Land Systems Research.

Itten, J. (1967). Art de la couleur. In 1961 : Kunst der Farbe, translated in French in 1967, then 2001. *Dessain and Tolra, 155p*.

Itti, L., & Koch, C. (2001). Feature combination strategies for saliency-based visual attention systems. *Journal of Electronic imaging*, *10*(1), 161-169.

Jäckle, D., Senaratne, H., Buchmüller, J., & Keim, D. A. (2015). *Integrated spatial uncertainty visualization using off-screen aggregation*. 49-53.

Jacob, C. (1985). Lectures antiques de la carte. *Études françaises*, *21*(2), 21-46.

Jacob, C. (1992). *L'empire des cartes : Approche théorique de la cartographie à travers l'histoire*. Albin Michel.

Jacob, R. J., & Karn, K. S. (2003). Eye tracking in human-computer interaction and usability research : Ready to deliver the promises. In *The mind's eye* (p. 573-605). Elsevier.

Jégou, L. (2013). *Vers une nouvelle prise en compte de l'esthétique dans la composition de la carte thématique : Propositions de méthodes et d'outils* [These de doctorat en Géographie]. Université Toulouse le Mirail - Toulouse II.

Jégou, L. (2014). *Une approche esthétique pour l'enseignement de la composition de gradients colorés*. https://doi.org/10.13140/2.1.2777.6323

Jégou, L. (2016). *L'imagination esthétique dans la conception graphique des cartes : Proposition de typologie illustrée*. 22.

Jégou, L., & Deblonde, J.-P. (2012). Vers une visualisation de la complexité de l'image cartographique. *Cybergeo : European Journal of Geography*. https://doi.org/10.4000/cybergeo.25271

Ji, M., Liu, L., Du, R., & Buchroithner, M. F. (2019). A comparative study of texture and convolutional neural network features for detecting collapsed buildings after earthquakes using pre-and post-event satellite imagery. *Remote Sensing*, *11*(10), 1202.

Joffroy, T., Garnier, P., Douline, A., & Moles, O. (2014). *Reconstruire Haïti après le séisme de janvier 2010 : Réduction des risques, cultures constructives et développement local*. CRAterre. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01159759

Joliveau, T. (2011). Le géoweb, un nouveau défi pour les bases de données géographiques. *LEspace geographique*, *Tome 40*(2), 154-163.

Joliveau, T., Noucher, M., & Roche, S. (2013). La cartographie 2.0, vers une approche critique d'un nouveau régime cartographique. *L'Information géographique*, *77*(4), 29-46.

Joubert, N. (2015). *La fabrique du document carte : Vers une méthode d'analyse d'une représentation de territoires* [These de doctorat en Sciences de l'information et de la communication]. Université Toulouse 3 Paul Sabatier.

Keates, J. (1996). Signs and symbols. *Understanding maps. Harlow, England: Longman*, 67-83.

Keates, J. (1964). *Cartographic communication*. 20-28.

Keehner, M., Hegarty, M., Cohen, C., Khooshabeh, P., & Montello, D. R. (2008). Spatial reasoning with external visualizations : What matters is what you see, not whether you interact. *Cognitive science*, *32*(7), 1099-1132.

Kent, A. J. (2012). From a dry statement of facts to a thing of beauty : Understanding aesthetics in the mapping and counter-mapping of place. *Cartographic Perspectives*, *73*, 37-60.

Kerle, N. (2010). Satellite-based damage mapping following the 2006 Indonesia earthquake—How accurate was it? *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *12*(6), 466-476. https://doi.org/10.1016/j.jag.2010.07.004

Kerle, N. (2013). Remote Sensing Based Post-Disaster Damage Mapping with Collaborative Methods. In S. Zlatanova, R. Peters, A. Dilo, & H. Scholten (Éds.), *Intelligent Systems for Crisis Management* (p. 121-133). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-33218-0_9

Kerle, N., & Hoffman, R. R. (2013). Collaborative damage mapping for emergency response : The role of Cognitive Systems Engineering. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *13*(1), 97-113. https://doi.org/10.5194/nhess-13-97-2013

Kerle, N., & Widartono, B. (2008). Geoinformation-based response to the 27 May Indonesia earthquake–an initial assessment. In *Remote Sensing and GIS Technologies for Monitoring and Prediction of Disasters* (p. 11-23). Springer.

Klett, S. (2011). *Rapid Mapping for Earthquake Disasters—A Team-based Method for Visual Damage Assessment Using Optical VHSR Satellite Data* [These de doctorat en Sciences de l'information géographique]. Université Tuebingen.

Koláčný, A. (1969). Cartographic information—A fundamental concept and term in modern cartography. *The cartographic journal*, *6*(1), 47-49.

Konecny, M., & Bandrova, T. (2006). Proposal for a standard in cartographic visualization of natural risks and disasters. *International Journal of Urban Sciences*, *10*(2), 130-139.

Konecny, M., Zlatanova, S., & Bandrova, T. L. (2010). *Geographic information and cartography for risk and crisis management : Towards better solutions*. Springer.

Kovecses, Z. (2010). *Metaphor : A practical introduction*. Oxford University Press.

Kraak, M.-J. (2005). *Cartography and geo-information science : An integrated approach*. *27*.

Kraak, M.-J. (2003). *The space-time cube revisited from a geovisualization perspective*. 1988-1996.

Kraak, M.-J., & Fabrikant, S. I. (2017). Of maps, cartography and the geography of the International Cartographic Association. *International Journal of Cartography*, *3*(sup1), 9-31.

Kraak, M.-J., & Ormeling, F. (2020). *Cartography : Visualization of geospatial data*. CRC Press.

Krebs, C. J. (1989). *Ecological methodology*. Harper & Row New York.

Krygier, J. B. (1994). Sound and geographic visualization. In *Modern cartography series* (Vol. 2, p. 149-166). Elsevier.

Krygier, J. B. (2015). Reflections on JB Harley's "Deconstructing the Map". *Cartographica: The International journal for geographic information and geovisualization*, *50*(1), 24-27.

Kunz, M. (2011). *Interactive visualizations of natural hazards data and associated uncertainties* [These de doctorat en Sciences de l'information géographique]. Université Zurich.

Kunz, M., & Hurni, L. (2011). How to enhance cartographic visualisations of natural hazards assessment results. *The Cartographic Journal*, *48*(1), 60-71.

Kuvedžić Divjak, A., & Lapaine, M. (2014). The role of the map in a crisis management environment : Applying the theory of cartographic communication and visualization. *Collegium antropologicum*, *38*(1), 187-193.

Kuveždić Divjak, A., & Lapaine, M. (2018). Crisis Maps—Observed Shortcomings and Recommendations for Improvement. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *7*(11), 436. https://doi.org/10.3390/ijgi7110436

Lacoste, Y. (2014). *La géographie, ça sert, d'abord, à faire la guerre*. La découverte.

Lacroix, A. (1904). *La Montagne Pelée et ses éruptions*. Masson.

Lagadec, P. (1979). Le défi du risque technologique majeur. *Futuribles*, *28*, 11-34.

Lagadec, P. (1991). *La gestion des crises. Outils de réflexion a l'usage des décideurs*. Éd. Science International.

Lagadec, P. (2002). Chapitre XVII La recherche confrontée à la question des crises. Pour des ruptures créatrices. *Risques collectifs et situations de crise: apports de la recherche en sciences humaines et sociales*, 297.

Lagadec, P. (2012). *Du risque majeur aux mégachocs*. Éd. Préventique.

Lagadec, P. (2019). Terra Incognita, Dossier de l'INHESJ sur « La prise de décision dans l'incertitude ». *LIREC*, *58*, 7-16.

Lagadec, P., & Guilhou, X. (2006). *Katrina : Quand les crises ne suivent plus le script*.

Lahousse, P., & Salvador, P.-G. (1998). Briançon, 24 juillet 1995 : Autopsie et enseignements d'une catastrophe naturelle. *Mappemonde*, *50*, 8-12.

Lajoie, G. (1995). Quelques outils du géographe dans le système de réflexion géographique : L'exemple du carroyage comme outil d'analyse spatiale. *Géographes associés*, *1*(1), 47-55. https://doi.org/10.3406/geoas.1995.1909

Lakoff, G., & Johnson, M. (1980). Metaphor we live by. *Chicago/London*, 16-44.

Lambert, N., & Zanin, C. (2016). *Manuel de cartographie : Principes, méthodes, applications*. Armand Colin.

Lang, S., Füreder, P., Riedler, B., Wendt, L., Braun, A., Tiede, D., Schoepfer, E., Zeil, P., Spröhnle, K., & Kulessa, K. (2019). Earth observation tools and services to increase the effectiveness of humanitarian assistance. *European Journal of Remote Sensing*, 1-19.

Lang, S., Schoepfer, E., Zeil, P., & Riedler, B. (2017). *Earth observation for humanitarian assistance. 1*, 157-165.

Lascoumes, P. (2007). Gouverner par les cartes. *Genèses*, *3*, 2-3.

Lavigne, F. (2016). *Tsunarisque : Le tsunami du 26 décembre 2004 à Aceh, Indonésie*. Éditions de la Sorbonne.

Le Bourhis, J.-P. (2007). Du savoir cartographique au pouvoir bureaucratique. Les cartes des zones inondables dans la politique des risques (1970-2000). *Genèses*, *3*, 75-96.

Le Fur, A. (2015). *Pratiques de la cartographie* (2e éd.). Armand Colin.

Le Ny, J.-F. (1991). Comprehension du langage et representations semantiques. *Psychologie ginktique et sciences cognitives, Edited by: Montangero, J. and Tryphon, A*, 125-142.

Lebraty, J.-F. (2006). Les systèmes décisionnels. In Akoka, A, Comyn-Wattiau, & I (Éds.), *Encyclopédie de l'informatique et des systèmes d'information* (p. 1338-1349). Vuibert. https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00264398

Lemoine, G., Corbane, C., Louvrier, C., & Kauffmann, M. (2013). Intercomparison and validation of building damage assessments based on post-Haiti 2010 earthquake imagery using multi-source reference data. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, *1*, 1445-1486. https://doi.org/10.5194/nhessd-1-1445-2013

Leone, F. (1996). *Concept de vulnérabilité appliqué à l'évaluation des risques générés par les phénomènes de mouvements de terrain* [These de doctorat en Géographie]. Univeristé Grenoble 1.

Leone, F. (2004). Une approche quantitative de la cartographie des risques naturels : Application expérimentale au patrimoine bâti de la Martinique (Antilles françaises)/A quantitative approach to natural risk mapping : Experimental application in Martinique (West Indies) including buildings. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, *10*(2), 117-126.

Leone, F. (2007). *Caractérisation des vulnérabilités aux catastrophes" naturelles" : Contribution à une évaluation géographique multirisque (mouvements de terrain, séismes, tsunamis, éruptions volcaniques, cyclones)*.

Leone, F., Battut, S., Thorez, G. C., Candela, T., & Vinet, F. (2020). Mortalité et cyclones en Guadeloupe (Antilles françaises). Apports d'un nouveau référentiel géo-historique (1635-2018). *EchoGéo*.

Leone, F., De Richemond, N. M., & Vinet, F. (2010). *Aléas naturels et gestion des risques*. Presses universitaires de France.

Leone, F., Lavigne, F., Paris, R., Denain, J.-C., & Vinet, F. (2011). A spatial analysis of the December 26th, 2004 tsunami-induced damages : Lessons learned for a better risk assessment integrating buildings vulnerability. *Applied Geography*, *31*(1), 363-375.

Leone, F., Omira, R., Péroche, M., Mellas, S., Meschinet de Richemond, N., Gherardi, M., Lavigne, F., Zourarah, B., Khalid, M., & Baptista, M. (2017). Apports des sciences géographiques à la prévention du risque tsunami au Maroc. *Hespéris-Tamuda : http://www.hesperis-tamuda.com/index.php/derniers-numero/numero-2017-fascicule1/400-17*, *LII*, 383-414.

Leone, F., Péroche, M., Candela, T., Rey, T., Vinet, F., Gherardi, M., Defossez, S., Lagahé, E., & Pradel, B. (sous presse). Drone et cartographie post-désastre : Exemples d'applications sur un territoire cycloné (Petites Antilles du Nord, ouragan Irma, septembre 2017). *Cartes et géomatiques, Cartographie et risques*, 10.

Leone, F., Péroche, M., & Gutton, R. (2014). Le risque tsunami en Martinique : Planifier une évacuation préventive en optimisant l'accessibilité de sites refuges. *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement*, *14*(2).

Leone, F., & Vinet, F. (2006). La vulnérabilité, un concept fondamental au cœur des méthodes d'évaluation des risques naturels. *La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles. Analyses géographiques*, *4*, 9-25.

Leone, F., & Vinet, F. (2017). Gérer les risques naturels : Pratiques et outils. *PULM*, 199.

Leone, F., Vinet, F., Denain, J.-C., & Bachri, S. (2007). Développement d'une méthodologie d'analyse spatiale des destructions consécutives au tsunami du 26 décembre 2004 (Banda Aceh, Indonésie). Premiers résultats pour l'élaboration de futurs scénarios de risque. *Géocarrefour*, *82*(1-2), 77-90.

L'Hostis, A. (2003). De l'Espace contracté à l'espace chiffonné : Apports de l'animation à la cartographie en relief des distances-temps modifiées par les réseaux de transport rapides. *Revue internationale de géomatique*, 69-80.

Li, X., Çöltekin, A., & Kraak, M.-J. (2010). *Visual exploration of eye movement data using the space-time-cube*. 295-309.

Libaert, T., Motulsky, B., Baygert, N., Vanderbiest, N., & Vicherat, M. (2018). *Communication de crise*. Pearson.

Likert, R. (1932). A technique for the measurement of attitudes. *Archives of psychology*, 55.

Lippmann, M. (1982). Analyse sommaire des impacts du séisme du 23.09. 80 en Campanie (Italie méridionale) en vue de l'aménagement. *Méditerranée*, *46*(3), 7-10.

Lobo, M.-J., Pietriga, E., & Appert, C. (2015). *An evaluation of interactive map comparison techniques*. 3573-3582.

Luchetti, G., Mancini, A., Sturari, M., Frontoni, E., & Zingaretti, P. (2017). Whistland : An augmented reality crowd-mapping system for civil protection and emergency management. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *6*(2), 41.

Lussault, M., & Lévy, J. (2003). *Dictionnaire de la géographie et de l'espace des sociétés*.

MacEachren, A. M. (1994). Visualization in modern cartography : Setting the agenda. *Visualization in modern cartography*, *28*(1), 1-12.

MacEachren, A. M. (1995). *1995 : How maps work : Representation, visualization and design, New York : Guilford Press*.

MacEachren, A. M. (2004). *How maps work : Representation, visualization, and design*. Guilford Press.

MacEachren, A. M., & Kraak, M.-J. (1997). *Exploratory cartographic visualization : Advancing the agenda*.

MacEachren, A. M., Robinson, A., Hopper, S., Gardner, S., Murray, R., Gahegan, M., & Hetzler, E. (2005). Visualizing geospatial information uncertainty : What we know and what we need to know. *Cartography and Geographic Information Science*, *32*(3), 139-160.

MacEachren, A. M., Roth, R. E., O'Brien, J., Li, B., Swingley, D., & Gahegan, M. (2012). Visual semiotics & uncertainty visualization : An empirical study. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, *18*(12), 2496-2505.

Mangiavilano, A. (2008). *Multi-scalarité du phénomène feu de forêt en régions méditerranéennes françaises de 1873 à 2006* [These de doctorat en Géographie]. Université Avignon.

Martinais, E. (2007). La cartographie au service de l'action publique. *EspacesTemps. net*, 7.

MATE, M. (1997). Plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPR)—Guide général. *Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Ministère de l'Equipement, du Transport et du Logement, Paris, La Documentation Française*.

Mathian, H., & Piron, M. (2001). Echelles géographiques et méthodes statistiques multidimensionnelles. In *Modèles en analyse spatiale* (Sanders L., p. 62-103). Hermès science publications.

Mathurin, E. (2013). La vulnérabilité sociale à la veille du séisme. *Haïti, réinventer l'avenir*, 45.

Matlin, M. W. (2002). Cognitive Psychology and College-Level Pedagogy : Two Siblings that Rarely Communicate. *New directions for teaching and learning*, *89*, 87-103.

Matsuoka, M., & Yamazaki, F. (2000). *Remote sensing technologies for earthquake damage detection : Examples for kobe, japan and luzon, the philippines*. Workshop on Mitigation of Earthquake Disaster by Advanced Technologies, Los Angeles, CA.

Mattelart, A., & Mattelart, M. (2004). *Histoire des théories de la communication* (3e éd.). La découverte.

McGranaghan, M. (1993). A cartographic view of spatial data quality. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, *30*(2-3), 8-19.

Mericskay, B. (2011). Les SIG et la cartographie à l'ère du géoweb. *LEspace geographique*, *40*(2), 142-153.

Mericskay, B. (2016). La cartographie à l'heure du Géoweb : Retour sur les nouveaux modes de représentation spatiale des données numériques. *Cartes & géomatique*, *229-230*, 37.

Mericskay, B., & Roche, S. (2011). Cartographie 2.0 : Le grand public, producteur de contenus et de savoirs géographiques avec le web 2.0. *Cybergeo: European Journal of Geography*.

Merz, B., Thieken, A., & Gocht, M. (2007). Flood risk mapping at the local scale : Concepts and challenges. In *Flood risk management in Europe* (p. 231-251). Springer.

Meszaros, T. (2017). Décider et agir dans le brouillard des crises majeures. *Tribune en ligne*, *879*.

Metz, C., & Bertin, J. (1971). Réflexions sur la « Sémiologie graphique » de Jacques Bertin [with Response]. *Annales. Histoire, Sciences Sociales*, *26*(3/4), 741-770.

Meulemans, T., Desgranges, B., Adam, S., & Eustache, F. (2003). *Évaluation et prise en charge des troubles mnésiques*. Solal.

Meyer, V., Kuhlicke, C., Luther, J., Fuchs, S., Priest, S., Dorner, W., Serrhini, K., Pardoe, J., McCarthy, S., & Seidel, J. (2012). Recommendations for the user-specific enhancement of flood maps. *Natural Hazards & Earth System Sciences*, *12*(5).

Moatty, A., Grancher, D., Virmoux, C., & Cavero, J. (2019). Bilan humain de l'ouragan Irma à Saint-Martin : La rumeur post-catastrophe comme révélateur des disparités socio-territoriales. *Géocarrefour*, *93*(93/2).

Molch, K. (2010). Multisensor and Multitemporal Fusion of VHR Satellite Imagery Based on KIM. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, *7*(1), 48-52. https://doi.org/10.1109/LGRS.2009.2019608

Moles, A. (1964). Théorie de l'information et message cartographique. *Sciences et Enseignement des Sciences*, *5*(32), 11-16.

Montello, D. R. (2002). Cognitive map-design research in the twentieth century : Theoretical and empirical approaches. *Cartography and Geographic Information Science*, *29*(3), 283-304.

Morel, V., Deboudt, P., Deldrève, V., Longuépée, J., Maillefert, M., Masson, E., Meur-Ferec, C., Petit, O., & Zuindeau, B. (2010). Les risques environnementaux : Lectures disciplinaires et champs de recherche interdisciplinaires. *Risque environnemental et action collective—Application aux risques industriels et d'érosion côtière dans le Pas-de-Calais*, 7-30.

Morel, V., Deboudt, P., Hellequin, A.-P., Herbert, V., & Meur-Ferec, C. (2006). Regard rétrospectif sur l'étude des risques en géographie à partir des publications universitaires (1980-2004). *L'Information géographique*, *70*(1), 6-24.

Morrison, J. L. (1974). A theoretical framework for cartographic generalization with the emphasis on the process of symbolization. *International Yearbook of Cartography*, *14*(1974), 115-127.

Müller, B. (2011). *Fukushima, le tremblement de l'histoire*. 6.

Muller, J.-C. (1978). La cartographie thématique aux États-Unis. *L'Espace géographique*, 139-149.

Munzner, T. (2014). *Visualization analysis and design*. CRC press.

Niesyto, H. (2006). Bildverstehen als mehrdimensionaler Prozess. Vergleichende Auswertung von Bildinterpretationen und methodische Reflexion. In *Bildinterpretation und Bildverstehen* (p. 253-286). Springer.

Noucher, M. (2015). De la trace à la carte et de la carte à la trace : Pour une approche critique des nouvelles sources de fabrique cartographique. *Traces numériques et territoires, Presses des Mines*, 12.

Noucher, M. (2017). *Les Petites Cartes du web. Approche critique des nouvelles fabriques cartographiques* (p. 70). Edition Rue d'Ulm, Presses de l'Ecole normale supérieure. https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01470743

Noucher, M., François, G., de Sède-Marceau, M.-H., & Pornon, H. (2008). *Pas de décision collective sans appropriation individuelle.* 23.

November, V., Camacho-Hübner, E., & Latour, B. (2010). Entering a risky territory : Space in the age of digital navigation. *Environment and planning D: Society and space*, *28*(4), 581-599.

Novikov, G., Trekin, A., Potapov, G., Ignatiev, V., & Burnaev, E. (2018). *Satellite imagery analysis for operational damage assessment in emergency situations*. 347-358.

Ogawa, N., & Yamazaki, F. (2000). Photo-interpretation of building damage due to earthquakes using aerial photographs. *Proceedings of the 12th world conference on earthquake engineering*, *1906*, 8.

Olston, C., & Mackinlay, J. D. (2002). *Visualizing data with bounded uncertainty*. 37-40.

Ory, J. (2016). *Connaissances pour la conception et la perception de styles topographiques* [These de doctorat en Sciences de l'information géographique, Université Paris-Est]. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01539594

Paegelow, M. (2004). *Géomatique et géographie de l'environnement. De l'analyse spatiale à la modélisation prospective* [These de doctorat en Géographie, Université Toulouse le Mirail - Toulouse II]. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01063119

Palka, G. (2015). *Amélioration de la cartographie du risque d'inondation par l'intégration des besoins et préférences des destinataires* [These de doctorat en Aménagement]. Université François Rabelais - Tours.

Palsky, G. (1996). *Des chiffres et des cartes : Naissance et développement de la cartographie quantitative française au XIXe siecle* (Vol. 19). Comité des travaux historiques et scientifiques-CTHS.

Palsky, G. (1998). Origines et évolution de la cartographie Thématique (XVII_XIX siècles). *Revista da Faculdade de Letras–Geografia*, 39-60.

Palsky, G. (2003). *L'esprit des cartes : Approches historiques, sémiologiques et sociologiques en cartographie : Diplôme d'habilitation à diriger des recherches*. Université de Paris XII-Val-de-Marne.

Palsky, G. (2012). Map design vs sémiologie graphique : Réflexions sur deux courants de la cartographie théorique. *Cartes & géomatique*, *212*, 7-12.

Panero, J., & Zelnik, M. (1979). *Human dimension & interior space : A source book of design reference standards*. Watson-Guptill.

Pang, A. (2008). Visualizing uncertainty in natural hazards. In *Risk Assessment, Modeling and Decision Support* (p. 261-294). Springer.

Pang, A. (2001). *Visualizing uncertainty in geo-spatial data*. *10*(1.20), 3823.

Pang, A., Wittenbrink, C. M., & Lodha, S. K. (1997). Approaches to uncertainty visualization. *The Visual Computer*, *13*(8), 370-390.

Pearson, C. M., & Clair, J. A. (1998). Reframing crisis management. *Academy of management review*, *23*(1), 59-76.

Peinturier, E. (2020). *Dans le vent des ouragans : Gestion de crise et mobilités, le cas de la Nouvelle-Orléans et sa région au cours des dernières décennies.* [These de doctorat en Géographie, Université Montpellier 3]. http://www.theses.fr/s93827

Péroche, M. (2016). *La gestion de crise tsunami dans la Caraïbe : Contribution géographique aux dispositifs d'alerte et d'évacuation des populations* [These de doctorat en Géographie, Université Montpellier 3]. https://www.theses.fr/2016MON30042

Péroche, M., Lagahé, E., Candela, T., Grancher, D., Leone, F., & Robustelli, M. (sous presse). L'information géographique et la cartographie au service des retours d'expériences scientifiques post-catastrophes—Antilles, saison cyclonique 2017. *Cartes et géomatiques*, *Cartographie et risques*, 18.

Pesaresi, M., Gerhardinger, A., & Haag, F. (2007). Rapid damage assessment of built-up structures using VHR satellite data in tsunami-affected areas. *International Journal of Remote Sensing*, *28*(13-14), 3013-3036. https://doi.org/10.1080/01431160601094492

Petchenik, B. B. (1977). Cognition in cartography. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, *14*(1), 117-128.

Petchenik, B. B. (1983). A mapmaker's perspective on map design research 1950-1980. *Graphic communication and design in contemporary cartography*.

Petersen, K. (2017). Visualizing Risk : Drawing Together and Pushing Apart with Sociotechnical Practices. *Journal of Contingencies and Crisis Management*, *25*(1), 39-50.

Peterson, M. P. (1994). *Spatial visualization through cartographic animation : Theory and practice*. 619-628.

Peyron, N., Bahl, M., Martin, A., & Alfonsi, F. (2007). ESPADA: Un outil innovant pour la gestion en temps réel des crues urbaines. *NOVATECH 2007*, 8.

Piatti, B., Bär, H. R., Reuschel, A.-K., Hurni, L., & Cartwright, W. (2009). Mapping literature : Towards a geography of fiction. In *Cartography and art* (p. 1-16). Springer.

Pierce, C. S. (1978). Écrits sur le signe. *Paris, France, Editions du Seuil*.

Pillalamarri, R. S., Barnette, B. D., Birkmire, D., & Karsh, R. (1993). Cluster : A program for the identification of eye-fixation-cluster characteristics. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, *25*(1), 9-15.

Piotrowski, A. (2018). *Review of differential evolution population size. Swarm Evol. Comput. 32, 1–24 (2017)*.

Plantin, J.-C. (2014a). *La cartographie numérique*. ISTE Group.

Plantin, J.-C. (2014b). L'avènement de la carte comme médiation. Généalogie des rencontres entre cartographie et théories de l'information. *Questions de communication*, *25*, 309-326.

Poidevin, D. (1999). *La Carte, moyen d'action*. Ellipses.

Ponsoda, V., Scott, D., & Findlay, J. M. (1995). A probability vector and transition matrix analysis of eye movements during visual search. *Acta psychologica*, *88*(2), 167-185.

Popelka, S., Brychtova, A., Brus, J., & Vozenilek, V. (2012). Advanced map optimalization based on eye-tracking. *Cartography–A Tool for Spatial Analysis*, 99-118.

Popelka, S., Vondrakova, A., & Hujnakova, P. (2019). Eye-tracking Evaluation of Weather Web Maps. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *8*(6), 256.

Pouivet, R. (2010). *L'ontologie de l'œuvre d'art*. Vrin.

Propeck-Zimmermann, E., Ravenel, L., & Saint-Gérand, T. (2002). Cartographie des risques technologiques majeurs : Nouvelles perspectives avec les SIG. *Mappe Monde*, *1*(65), 17-21.

Pumain, D., & Saint-Julien, T. (2010). *Analyse spatiale : Les localisations*. Armand Colin.

Pumain, D., Saint-Julien, T., Dumas, E., & Mathian, H. (2001). *Les interactions spatiales : Flux et changements dans l'espace géographique*. Armand Colin.

Quarantelli, E. L. (1988). Disaster crisis management : A summary of research findings. *Journal of management studies*, *25*(4), 373-385.

Quinton, E., Plumejeaud-Perreau, C., Linyer, H., Ancelin, J., Pignol, C., Cipière, S., Heintz, W., Damy, S., & Bretagnolle, V. (2018). *Gestion d'échantillons pour la recherche scientifique avec Collec-Science*. 41-61.

Raffestin, C. (1986). *Ecogenèse territoriale et territorialité*. Fayard & Fondation Diderot.

Raffestin, C. (2019). *Pour une géographie du pouvoir*. ENS éditions.

Reghezza-Zitt, M. (2019). *Gestion de crise et incertitude (s) ou comment planifier le hors-cadre et l'inimaginable. Application aux crises résultant de crues majeures en Île-de-France*. *2*, 5-30.

Reghezza-Zitt, M., Rufat, S., Djament-Tran, G., Le Blanc, A., & Lhomme, S. (2012). What resilience is not : Uses and abuses. *Cybergeo: European Journal of Geography*.

Rejeski, D. (1993). GIS and risk : A three-culture problem. *Environmental modeling with GIS*, 318-331.

Rey, A. (2011). *Dictionnaire historique de la langue française*. Le robert.

Rey, T., Candela, T., Péroche, M., & Leone, F. (2020). Changements côtiers et inondations suite au passage d'un ouragan extrême (Irma, 2017) aux Petites Antilles. *EchoGéo*, *51*.

Rey, T., Leone, F., Candela, T., Belmadani, A., Palany, P., Krien, Y., Cécé, R., Gherardi, M., Péroche, M., & Zahibo, N. (2019). Coastal Processes and Influence on Damage to Urban Structures during Hurricane Irma (St-Martin & St-Barthélemy, French West Indies). *Journal of Marine Science and Engineering*, *7*(7), 215. https://doi.org/10.3390/jmse7070215

Rimbert, S. (1973). Des «bruits» qui brouillent les cartes : Les insuffisances de la lecture visuelle des cartes thématiques. *L'Espace géographique*, 313-316.

Riveiro, M. (2007). *Evaluation of uncertainty visualization techniques for information fusion*. 1-8.

Robert, K. (2002). La théorie de la décision. *la Découverte*.

Robinson, A. (1952). The look of Maps. University of Wisconsin Press. *Madison WI*.

Robinson, A. C., Pezanowski, S., Troedson, S., Bianchetti, R., Blanford, J., Stevens, J., Guidero, E., Roth, R. E., & MacEachren, A. M. (2013). Symbol Store : Sharing map symbols for emergency management. *Cartography and Geographic Information Science*, *40*(5), 415-426.

Robinson, A. H., & Petchenik, B. B. (1975). The Map as a Communication System. *The Cartographic Journal*, *12*(1), 7-15. https://doi.org/10.1179/caj.1975.12.1.7

Robinson, A. H., Sale, R. D., Morrison, J. L., & Muehrcke, P. (1984). *Elements of Cartography*. New York: John Wiley and Sons.

Roche, S., Propeck-Zimmermann, E., & Mericskay, B. (2013). GeoWeb and crisis management : Issues and perspectives of volunteered geographic information. *GeoJournal*, *78*(1), 21-40.

Rolland-May, C. (1987). La théorie des ensembles flous et son intérêt en géographie. *L'Espace géographique*, 42-50.

Rossi, J.-P. (2005). *Psychologie de la mémoire : De la mémoire épisodique à la mémoire sémantique*. De Boeck Supérieur.

Roth, S. F., & Mattis, J. (1990). *Data characterization for intelligent graphics presentation*. 193-200.

Roux Dufort, C. (2005). « Comment en est-on arrivé la ? » du terrain de crise à la catastrophe. *Le Magazine de La Communication de Crise et Sensible*, 18.

Roux-Dufort, C. (2010). La vulnérabilité organisationnelle à la loupe : Entre fragilité et ignorance. *Téléscope*, *16*(2), 1-21.

Roy, B. (1993). Decision science or decision-aid science? *European Journal of Operational Research*, *66*(2), 184-203. https://doi.org/10.1016/0377-2217(93)90312-B

Ruas, A. (2004). *Le changement de niveau de détail dans la représentation de l'information géographique* [Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches (HDR)]. Université Marne-la-Vallée.

Rubin, E. (1915). *Synsoplevede figurer : Studier i psykologisk analyse* (Vol. 1). Gyldendal.

Saoutal, A., Cahier, J.-P., & Matta, N. (2014). Modeling the communication between emergency actors in crisis management. *2014 International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS)*, 545-552.

Scharfe, W. (1986). Max Eckert's Kartenwissenschaft—The turning point in German cartography. *Imago Mundi*, *38*(1), 61-66.

Seipel, S., & Lim, N. J. (2017). Color map design for visualization in flood risk assessment. *International Journal of Geographical Information Science*, *31*(11), 2286-2309.

Serre, D., Barroca, B., & Laganier, R. (2012). *Resilience and urban risk management*. CRC Press.

Sève, R. (2009). *Science de la couleur : Aspects physiques et perceptifs*. Chalagam.

Severo, M., & Venturini, T. (2016). Topological and Topographical Implications of Web Mapping. *Reseaux*, *1*, 85-105.

Shankar, R., Bjorgo, E., & Dell'Oro, L. (2010). *Accuracy Assessment of Post-Earthquake Building Damage Classification Haiti*. 11-13.

Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell system technical journal*, *27*(3), 379-423.

Shannon, C. E., & Weaver, W. (1949). A mathematical model of communication. *Urbana, IL: University of Illinois Press*, *11*.

Shaparev, N., & Yakubailik, O. (2016). *Usage of web mapping systems and services for information support of regional management*. *79*, 01081.

Sibertin-Blanc, G. (2010). Cartographie et territoires. La spatialité géographique comme analyseur des formes de subjectivité selon Gilles Deleuze. *L'Espace géographique*, *39*(3), 225-238. Cairn.info. https://doi.org/10.3917/eg.393.0225

Simner, J., Mulvenna, C., Sagiv, N., Tsakanikos, E., Witherby, S. A., Fraser, C., Scott, K., & Ward, J. (2006). Synaesthesia : The prevalence of atypical cross-modal experiences. *Perception*, *35*(8), 1024-1033.

Singleton, A., & Brunsdon, C. (2014). Escaping the pushpin paradigm in geographic information science:(re) presenting national crime data. *Area*, *46*(3), 294-304.

Souissi, N., & Mainguenaud, M. (2013). Modèle pour un serveur de données géographiques. *Revue internationale de géomatique–n*, *255*, 285.

Staněk, K., Friedmannová, L., Kubíček, P., & Konečný, M. (2010). Selected issues of cartographic communication optimization for emergency centers. *International Journal of Digital Earth*, *3*(4), 316-339. https://doi.org/10.1080/17538947.2010.484511

Steinberg, J. (2000). L'apport de la sémiologie graphique de Jacques Bertin à la cartographie pour l'aménagement et l'urbanisme. *Cybergeo*. https://doi.org/10.4000/cybergeo.497

Stevens, D. (2008). Increasing the Use of Geospatial Technologies for Emergency Response and Disaster Rehabilitation in Developing Countries. In S. Nayak & S. Zlatanova (Éds.), *Remote Sensing and GIS Technologies for Monitoring and Prediction of Disasters* (p. 57-71). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-79259-8_4

Strazzeri, D., & Manche, Y. (1998). L'enquête permanente sur les avalanches. *Revue de géographie alpine*, *86*(2), 45-52.

Sui, D. Z., & Goodchild, M. F. (2001). GIS as media? *International Journal of Geographical Information Science*, *15*(5), 387-390.

Svatonova, H., & Kolejka, J. (2017). Comparative research of visual interpretation of aerial images and topographic maps for unskilled users : Searching for objects important for decision-making in crisis situations. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *6*(8), 231.

Tacnet, J.-M. (2009). *Prise en compte de l'incertitude dans l'expertise des risques naturels en montagne par analyse multicritères et fusion d'information* [These de doctorat en Sciences et techniques de l'environnement]. Ecole des Mines de Saint-Etienne.

Théberge, P. (2005). Sound maps : Music and sound in cybercartography. *Cybercartography: Theory and practice*, 389-410.

Thomson, J., Hetzler, E., MacEachren, A. M., Gahegan, M., & Pavel, M. (2005). *A typology for visualizing uncertainty*. *5669*, 146-157.

Timpf, S. (1999). *Abstraction, levels of detail, and hierarchies in map series*. 125-139.

Torpelund-Bruin, C., & Lee, I. (2009). *When generalized Voronoi diagrams meet GeoWeb for emergency management*. 64-75.

Touya, G. (2017). *Vers l'automatisation de la production de cartes* [These de doctorat en Sciences de l'information géographique]. Université Paris-Est.

Tralli, D. M. (2000). *Assessment of advanced technologies for loss estimation*. University at Buffalo.

Traore, E., Yacouba, H., & Maiga, A. (2004). Amélioration des possibilités des modèles de données SIG pour une gestion de l'incertitude et de l'imprécision en tant qu'information floue. *Sud Sciences et technologies*, 8.

Traun, C. (2013). *Digital= Different ? New Purposes of Maps*. *13*, 33-40.

Tufte, E. R. (2001). *The visual display of quantitative information* (Vol. 2). Graphics press Cheshire, CT.

Tufte, E. R., & Graves-Morris, P. R. (1983). *The visual display of quantitative information* (Vol. 2, Numéro 9). Graphics press Cheshire, CT.

Tukey, J. W. (1977). *Exploratory data analysis* (Vol. 2). Reading, MA.

Tyner, J. A. (2010). *Principles of map design*. Guilford Press.

Veyret, Y., Beucher, S., & Bonnard, J.-Y. (2005). Risques naturels et territoires (Natural hazards and territories). *Bulletin de l'Association de géographes français*, *82*(1), 63-74.

Veyret, Y., & Laganier, R. (2013). *Atlas des risques en France. Prévenir les catastrophes naturelles et technologiques*. Autrement.

Vidal de la Blache, P. (1888). Des divisions fondamentales du sol français. *Le Bulletin Littéraire*, *2*(1), 1-7.

Vidal de La Blache, P. (1910). Régions françaises. *Revue de Paris*, *6*, 821-849.

Voigt, S., Giulio-Tonolo, F., Lyons, J., Kučera, J., Jones, B., Schneiderhan, T., Platzeck, G., Kaku, K., Hazarika, M. K., & Czaran, L. (2016). Global trends in satellite-based emergency mapping. *Science*, *353*(6296), 247-252.

Voigt, S., Kemper, T., Riedlinger, T., Kiefl, R., Scholte, K., & Mehl, H. (2007). Satellite Image Analysis for Disaster and Crisis-Management Support. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *45*(6), 1520-1528. https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.895830

Voigt, S., Riedlinger, T., Reinartz, P., Künzer, C., Kiefl, R., Kemper, T., & Mehl, H. (2005). Experience and perspective of providing satellite based crisis information, emergency mapping & disaster monitoring information to decision makers and relief workers. In *Geo-information for disaster management* (p. 519-531). Springer.

Voigt, S., Schneiderhan, T., Twele, A., Gähler, M., Stein, E., & Mehl, H. (2011). Rapid damage assessment and situation mapping : Learning from the 2010 Haiti earthquake. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing (PE&RS)*, *77*(9), 923-931.

Ware, C. (2010). *Visual thinking for design*. Elsevier.

Wartman, J., Montgomery, D. R., Anderson, S. A., Keaton, J. R., Benoît, J., dela Chapelle, J., & Gilbert, R. (2016). The 22 March 2014 Oso landslide, Washington, USA. *Geomorphology*, *253*, 275-288.

Weaver, W. (1953). Recent contributions to the mathematical theory of communication. *ETC: a review of general semantics*, 261-281.

Weick, K. E., & Roberts, K. H. (1993). Collective mind in organizations : Heedful interrelating on flight decks. *Administrative science quarterly*, 357-381.

Wieczorek, I., & Briand, L. (2001). Resource estimation in software engineering. *Technical Report, International SOftware Engineering Research Network*.

Wisner, B., Blaikie, P. M., Blaikie, P., Cannon, T., & Davis, I. (2004). *At risk : Natural hazards, people's vulnerability and disasters*. Psychology Press.

Wisner, B., Westgate, K., & OKEEFE, P. (1976). Poverty and disaster. *New Society*, *37*(727), 546-548.

Wittenbrink, C. M., Pang, A. T., & Lodha, S. K. (1996). Glyphs for visualizing uncertainty in vector fields. *IEEE transactions on Visualization and Computer Graphics*, *2*(3), 266-279.

Wood, D., & Fels, J. (1992). *The power of maps*. Guilford Press.

Yao-N'dré, M. (2013). *Etude des aspects visuels et oculomoteurs de la lecture en vision centrale et périphérique* [These de doctorat en Neurosciences]. Université Aix-Marseille.

Yésou, H., Chastanet, P., Maxant, J., Huber, C., Clandillon, S., Battiston, S., Proy, C., & de Fraipont, P. (2015). Contribution de l'imagerie pléiades à la cartographie rapide des dégâts suite à des catastrophes majeures : Retours d'expériences après deux ans d'actions de cartographie rapide localisées en Asie, en Afrique, en Europe et aux caraïbes. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, *209*, 81-87.

Yésou, H., Escudier, A., Battiston, S., Dardillac, J.-Y., Clandillon, S., Uribe, C., Caspard, M., Giraud, H., Maxant, J., Durand, A., Fellah, K., Studer, M., Huber, C., Philippoteaux, L., de Fraipont, P., & Fontannaz, D. (2015). Exploitation de l'imagerie pléiades en cartographie réactive suite à des catastrophes naturelles ayant affecté le territoire français en 2013. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, *209*, 39-45.

Zadeh, L. A. (1965). Information and control. *Fuzzy sets*, *8*(3), 338-353.

Zanin, C. (2006a). Cartographie thématique. *Hypergeo*, *article 377*, 8.

Zanin, C. (2006b). Cartographies. *Hypergeo*, *article 371*, 5.

Zanin, C., & Trémélo, M.-L. (2003). *Savoir-faire une carte : Aide à la conception et à la réalisation d'une carte thématique univariée*. Belin.

Zaninetti, J.-M. (2005). *Statistique spatiale : Méthodes et applications géomatiques*. Hermès science publications.

Zhang, J., & Goodchild, M. F. (2002). *Uncertainty in geographical information*. CRC press.

Zimmermann, É. (1996). De l'usage de la cartographie dans l'appréhension des risques technologiques majeurs/How cartography can help in understanding major technological hazards. *Géocarrefour*, *71*(1), 11-16.

Zipf, G. K. (1932). *Selected studies of the principle of relative frequency in language*. Harvard Univ. Press.

Zipf, G. K. (1946). The psychology of language. In *Encyclopedia of psychology* (p. 332-341). Philosophical Library.

Zoller, H. G., & Beguin, H. (1992). *Aide à la décision : L'évaluation des projets d'aménagement*. Economica.

Liste des figures

Figure 1 : Démarche méthodologique de la recherche 16
Figure 2 : Village mythique et croix labyrinthique, Bedolina, Val Cannonica (Christinger, 1965) : gravures réalisées entre l'âge du Bronze et l'âge du Fer (3000 av. J.-C) 21
Figure 3 : Carte figurative de l'instruction populaire de Charles Dupin, 1826 (Bibliothèque Nationale de France, Paris) 23
Figure 4 : Notion d'espace à risque et variables d'entrée (d'après Leone,2004 modifié Candela, 2021) 28
Figure 5 : Notion d'espace à risque majeur 30
Figure 6 : Les phases de la crise (adapté de Péroche, 2016) 34
Figure 7 : Les trois cultures du risque (d'après Rejeski, 1993) 38
Figure 8 : Extrait des cartes et clichés servant à la reconstitution de l'éruption de la Montagne Pelée de 1902 en Martinique (Lacroix, 1904) 39
Figure 9 : Plan de prévention des risques inondation (PPRI Cognac, 2000) (zonage réglementaire) 40
Figure 10 : Carte des zones sismiques de la France (plan séisme, 2015) 41
Figure 11 : Carte des risques majeurs du DICRIM la ville de Strasbourg (RisCrises, 2019) 42
Figure 12 : Extrait du plan d'évacuation en cas de tsunami (UMR-GRED, 2014) 43
Figure 13 : Cartographie opérationnelle du PCS de la commune de Cenon (RisCrises, 2020) 45
Figure 14 : Cartographie « d'impact » du passage du cyclone Irma à Saint-Jean Bay, Saint Barthélemy -France (SERTIT, 2017) 46
Figure 15 : Occurrence des catastrophes naturelles à cinétique rapide entre 1970 et2019 (d'après Leone et al. 2010, Ceone, 2019) 47
Figure 16 : Intégration des technologies d'Observation de la Terre dans les phases de la gestion de crise 50
Figure 17 : Photo-interprétation selon l'approche multi-temporelle 52
Figure 18 : Localisation des secteurs d'étude du projet ANR TIREX 57
Figure 19 : Processus d'acquisition des écarts de dommages observés au bâti puis représentation à la maille par résumé statistique 59
Figure 20 : Écarts mesurés & comparés à l'échelle du bâti et de la maille (150 m * 173 m) à partir des évaluations de dommage Copernicus EMS vs SERTIT, 2017 (a), et représentation spatiale sur la partie française (b). 60
Figure 21 : Evolution du nombre de cartographies des dommages produites par jour à la suite du séisme de Haïti du12 janvier 2010. (Source : Klett, 2011, RELIEFWEB, n.d.) 62
Figure 22 : Diversité des représentations du dommage à la suite du séisme de Haïti, 2010 (Kerle & Hoffman, 2013) 63
Figure 23 : Transformation de la scène visuelle en représentation mentale 65
Figure 24 : Schéma champ de vision humaine 66
Figure 25 : Archétype général de la carte comme processus de communication de l'information 68
Figure 26 : Modèle de la communication cartographique selon Koláčný (1968) 70
Figure 27 : Niveaux des variables rétiniennes (Bertin, 1973) 74
Figure 28 : Représentation de l'espace tridimensionnel de l'utilisation de la carte selon MacEachren (1994) 77
Figure 29 : Les contraintes de la cartographie des dommages post-catastrophes dans la communication opérationnelle 85
Figure 30 : Première phase de la démarche méthodologique 91

Figure 31 : Processus de reconnaissance d'un style cartographique par l'expérience utilisateur (d'après Ory, 2016 modifié Candela, 2021) 93
Figure 32 : Tableau de signes graphiques extraits des 26 cartes traitant de la catastrophe d'Oso, Washington (USA) 96
Figure 33 : Processus de la reconnaissance d'un style cartographique au moyen d'une grille d'analyse cartographique multicritère 99
Figure 34 : Classification temporelle des cartes post-catastrophes échantillonnées 106
Figure 35 : Répartition géographique des échantillons cartographiques analysés et datation 107
Figure 36 : Mosaïque des producteurs de cartes de dommages (1) et part des productions par type d'activation (2) 108
Figure 37 : Distribution des échelles cartographiques de l'échantillon de cartes analysées 109
Figure 38 : Représentation thématique de la donnée en fonction des échelles cartographiques 110
Figure 39 : Type d'implantation thématique de la donnée en fonction des échelles cartographiques 110
Figure 40 : Abstraction thématique de la donnée en fonction des échelles cartographiques 111
Figure 41 : Densité (1) et sélectivité (2) des informations thématiques de la donnée en fonction des échelles cartographiques et du type d'implantation 112
Figure 42 : Type d'implantation et de techniques employées par type d'activation 113
Figure 43 : Pourcentage d'itérations observées en fonction des paramètres d'échelle d'appréciation, des types d'implantations et des techniques employées pour la représentation des dommages aux bâtiments 116
Figure 44 : Type d'information représentée par les techniques cartographiques post-catastrophes. 118
Figure 45 : Colorimétrie utilisée dans la typologie des dommages par techniques cartographiques, détaillés pour les représentations ponctuelles (a) et surfaciques (b) selon le type d'informations, qualitatif (Qa) et quantitatif (Qt) ordonnée (o) ou non 120
Figure 46 : Axes routiers et représentativité en fonction des échelles cartographiques dans les cartes de dommages post-catastrophes 121
Figure 47 : Gamme colorimétrique des axes routiers en fonction des échelles cartographiques 122
Figure 48 : Classification des symboles ponctuels représentant des points d'intérêts utiles à la gestion de crise dans la cartographie des dommages post-catastrophes 123
Figure 49 : Type de fond de carte en fonction des échelles cartographiques 124
Figure 50 : Type de fond de carte en fonction des échelles cartographiques et par type d'activation 125
Figure 51 : Extrait de la carte d'évaluation des dommages à la suite du cyclone Irma (Copernicus, EMS, 2017) 126
Figure 52 : Localisation du secteur d'étude (Kaupp 2009) 127
Figure 53 : Population exposée au séisme de 2010 par niveau d'intensité (a) et répartition des zones d'intensité du séisme (b) (Joffroy et al., 2014) 128
Figure 54 : Échantillon de cartes du cadre d'étude #1 (échelles cartographiques larges) 132
Figure 55 : Échantillon de cartes du cadre d'étude #2 (échelles cartographiques intermédiaires) 133
Figure 56 : Échantillon de cartes du cadre d'étude #3 (échelles fines) 134
Figure 57 : Liste des tâches à accomplir pour l'expérimentation #1 135
Figure 58 : Liste des tâches à accomplir pour l'analyse collective des cartes 136
Figure 59 : Synthèse de la procédure de la phase active de l'expérimentation #1 : individuelle et collective 137
Figure 60 : Processus de collecte du pourcentage de chevauchement des secteurs tracés par les participants 138

Figure 61 : Filtrage des aires supérieures à 30% de la surface totale d'une maille 139
Figure 62 : Résumé statistique par maille homogène des zones vectorisées par les participants..... 140
Figure 63 : Nombre de réponses différentes obtenues (y) par carte (x) à la tâche 2 : délimiter la/les zone(s) et nommer le/les secteur(s) les plus touchés(s) (expérimentation #1) 141
Figure 64 : 1) Pourcentage de réponses (y) obtenues pour les tâches T3.1 et T3.2 par carte (x) et 2) Pourcentage de réponses attendues et hors sujet pour les tâches T3.1 et T3.2 (expérimentation #1) 142
Figure 65 : Taux de réponses hors sujet (hs) et pertinentes (y) pour la tâche T3.1 pour chaque carte qui présente une information permettant d'estimer les niveaux de dommages (expérimentation #1) 143
Figure 66 : Interprétation possible des pourcentages de citations 144
Figure 67 : Pourcentage de citations au sein des cartes du cadre d'étude #1, échelles larges (1), et synthèse des zones de convergence et de divergence des interprétations (1-1) (expérimentation #1) 146
Figure 68 : Pourcentage de citations au sein des cartes du cadre d'étude #2, échelles intermédiaires (2), et du cadre d'étude #3, échelles fines (3) ; et synthèse des zones de convergence et de divergence des interprétations (2-1 et 3-1) (expérimentation #1)..... 148
Figure 69 : Répartition statistique des mailles en fonction des pourcentages de citations (expérimentation #1) 150
Figure 70 : Pourcentage de citations des zones définies comme les plus touchées après analyse collective des cartes par les participants (expérimentation #1)..... 151
Figure 71 : Pourcentage de mailles convergentes et divergentes entre les deux groupes (étudiants vs scientifiques) pour chacune des cartes étudiées (expérimentation #1) 152
Figure 72 : Comparaison entre les niveaux de certitude (N.C) et de lisibilité (N.L) estimés avec les résultats obtenus pour les tâches d'analyse et de vectorisation des cinq techniques testées (expérimentation #1) 154
Figure 73 : Classification des cartes par ordre d'efficacité visuelle (de 1à 13) et répartition des taux de citations par type de représentations cartographiques (expérimentation #1) 158
Figure 74 : Seconde phase de la démarche méthodologique..... 164
Figure 75 : Comparaison des résultats quantitatifs obtenus selon un maillage administratif, par blocs urbains et un carroyage régulier..... 166
Figure 76 : les trois principales solutions graphiques à la représentation du quantitatif zonale..... 169
Figure 77 : Analyse de la répartition des différents niveaux de dommages (données : Copernicus EMSR, 2017)..... 172
Figure 78 : Comparaison des différentes méthodes de calcul statistique et de la fréquence améliorée des niveaux de dommages (données : Copernicus EMSR, 2017) 173
Figure 79 : Création d'une méthode hybride (d) entre le point unique (a) et les points de Bertin (c) 174
Figure 80 : Échantillon colorimétrique d'iconographie en lien avec les désastres..... 177
Figure 81 : Échantillon colorimétrique des cartes de dommages post-catastrophes 178
Figure 82 : Représentation des dommages par semi-régulier de points proportionnels..... 180
Figure 83 : Processus de lecture d'une information cartographique et mobilisation de la mémoire dans la création d'un schéma mémoriel cognitif..... 183
Figure 84 : Échantillon cartographique utilisé pour l'expérimentation : Carte #1, Carroyage (DLR ZKI, 2013) ; Carte #2, surface du bâti (Copernicus EMSRN049, 2018) ; Carte #3, Blocs urbains (SERTIT, 2010) ; Carte #4, Densité (SERTIT, 2010) ; Carte #5, Semi-régulier de points proportionnels (EMSR232 et 234, 2017); Carte #6, Interpolation (UNOSAT, 2010) 187
Figure 85 : Contraintes visuelles déclarées par les participants de l'expérimentation #2 189

Figure 86 : Liste des tâches à accomplir lors de l'expérimentation #2 190
Figure 87 : Lieu de réception des participants et configuration (clichés Candela, 2020) 191
Figure 88 : Synthèse de la procédure de la phase active de l'expérimentation #2 192
Figure 89 : De la trace papier à la trace numérique 193
Figure 90 : Part en pourcentage des différentes catégories d'acteurs participants (expérimentation #2) 195
Figure 91 : Détail de la catégorie privé (x) en pourcentage (y) (expérimentation #2) 195
Figure 92 : Niveau cartographique des participants (expérimentation #2) 196
Figure 93 : Niveau cartographique des acteurs publics (expérimentation #2) 196
Figure 94 : Part en pourcentage du niveau cartographique des acteurs publics (1a) et détaillés aux sous-ensembles (1c) (expérimentation #2) 197
Figure 95 : Part en pourcentage du niveau cartographique des acteurs privés (1a) détaillé au sous-ensemble de la catégorie (1b) (expérimentation #2) 198
Figure 96 : Niveau cartographique des forces de secours (expérimentation #2) 199
Figure 97 : Niveau cartographique des scientifiques (expérimentation #2) 199
Figure 98 : Niveau cartographique des étudiants (expérimentation #2) 199
Figure 99 : Niveau cartographique des participants autres (expérimentation #2) 199
Figure 100 : Nombre de citations des usages de la cartographie détaillée par catégorie d'acteurs (expérimentation #2) 201
Figure 101 : Nombre de citations des usages des cartes de dommages détaillés par catégorie d'acteurs (expérimentation #2) 202
Figure 102 : Répartition par type de support cartographique (expérimentation #2) 203
Figure 103 : Support cartographique privilégié détaillé par catégorie d'acteurs (expérimentation #2) 203
Figure 104 : Rappel des représentations cartographiques utilisées pour l'expérimentation #2 204
Figure 105 : Pourcentage moyen de bonnes et mauvaises réponses à la tâche 3.1, localisation des secteurs le plus touchés (expérimentation #2) 204
Figure 106 : Fréquence des bonnes et mauvaises réponses à la tâche 3.2, localisation des secteurs les moins touchés (expérimentation #2) 206
Figure 107 : Résultats de la tâche 4.1, estimation du niveau de dommage à un point précis (expérimentation #2) 207
Figure 108 : Résultats de la tâche #4, estimation de la quantité de bâtiments touchés à un point précis (expérimentation #2) 208
Figure 109 : Analyse des réponses de la tâche T4 sur l'estimation quantitative des dommages à un point précis pour les cartes #1 (1) ; #3 (2) et #4 (3) (expérimentation #2) 209
Figure 110 : Pourcentages moyens de bonnes réponses pour l'ensemble des tâches d'analyse visuelle (T3 et T4) (expérimentation #2) 210
Figure 111 : Pourcentage de correspondances des zones mémorisées par les participants pour les 6 représentations (a) et taux de mémorisations correctes en fonction du pourcentage de correspondance (b) (expérimentation #2) 211
Figure 112 : a) Comparaison spatiale des taux de correspondance par catégorie d'acteurs, pour les 6 cartes; analyse des pourcentages de mémorisation correcte (b) et distribution spatiale par rapport au total des mailles toutes catégories confondues (c) (expérimentation #2) 214
Figure 113 : a) Comparaison spatiale des taux de correspondance par niveau cartographique, pour les 6 cartes; analyse des pourcentages de mémorisation correcte (b) et distribution spatiale par rapport au total des mailles toutes catégories confondues (c) (expérimentation #2) 218
Figure 114 : Résultats de la comparaison du critère : qualité visuelle de la représentation des dommages (expérimentation #2) 221

Figure 115 : Comparaison des critères d'efficacité visuelle (a), de charge d'information (b) et de niveau de confiance (d) selon les niveaux en cartographie (expérimentation #2)..... 222
Figure 116 : Pourcentage moyen de bonnes réponses à la tâche T3 et T4(a), de taux de mémorisation correcte en fonction du pourcentage de correspondances (b) face aux notes obtenues aux critères d'efficacité visuelle (c) et au niveau de certitude (d) pour chaque carte (expérimentation #2)..... 223
Figure 117 : Listes des techniques visuelles évaluées et exemples de représentations cartographiques (cf. annexe 9) (expérimentation #3) 228
Figure 118 : liste des tâches à accomplir pour l'expérimentation #3 230
Figure 119 : Extrais des tests d'Ishihara pour la détection des sujets dyschromates et protanopes (chiffre : 1 – 5 – 9 – 7) (expérimentation #3) 231
Figure 120 : Méthode standard de la distribution des essais, dite du carré latin (expérimentation #3) 232
Figure 121 : Configuration de l'expérimentation #3 233
Figure 122 : Synthèse de la procédure de la phase active de l'expérimentation #3 234
Figure 123 : Rappel des techniques testées dans l'expérimentation #3 235
Figure 124 : Pourcentage de bonnes réponses pour les tâches 1 (T1) pour les 6 techniques testées (P : point, SRP_c : semi-régulier de points proportionnels carrés, SRP_h : semi-régulier de points proportionnels hexagonaux, C_c : Carroyage carré, C_h : Carroyage hexagone et IDWI : Interpolation IDW) (expérimentation #3) 236
Figure 125 : Pourcentage de bonnes réponses moyen pour la tâche T1.1 (a) et T1.2 (b) en fonction des techniques et des différents secteurs géographiques (expérimentation #3) 238
Figure 126 : Pourcentage de bonnes réponses moyen pour les tâches T2 (expérimentation #3)..... 239
Figure 127 : Compilation des temps moyens par technique et par tâche (expérimentation #3) 240
Figure 128 : Compilation des temps moyens pour les tâches T1.1 (a) et T1.2 (b) en fonction des techniques et des différents secteurs géographiques (expérimentation #3)..... 242
Figure 129 : Attention visuelle pour les 6 techniques étudiées lors de l'exécution de T1.1 pour le secteur 1 (a) et confrontation aux taux de bonnes réponses (b) et temps de réponse (d) (expérimentation #3) 244
Figure 130 : Attention visuelle pour les 6 techniques étudiées lors de l'exécution de T1.1 pour le secteur 2 (a) et confrontation aux taux de bonnes réponses (b) et temps de réponse (d) (expérimentation #3) 245
Figure 131 : Attention visuelle pour les 6 techniques étudiées lors de l'exécution de T1.1 pour le secteur 3 (a) et confrontation aux taux de bonnes réponses (b) et temps de réponse (d) (expérimentation #3) 246
Figure 132 : Attention visuelle pour les 6 techniques étudiées lors de l'exécution de T1.1 pour le secteur 4 (a) et confrontation aux taux de bonnes réponses (b) et temps de réponse (d) (expérimentation #3) 247
Figure 133 : Notes de 1 (très mauvaise) à 5 (très bonne) attribuées par les utilisateurs en matière d'efficacité (a), d'esthétisme (b) et du rapport de ces deux critères (c) pour chaque technique (expérimentation #3) 248
Figure 134 : Comparaison des pourcentages moyens de bonnes réponses pour l'ensemble des tâches (a) à l'efficacité perçue des participants (b), par techniques ; Et différence entre la perception de l'efficacité et de l'esthétisme versus les moins bons et les meilleurs résultats obtenus pour l'ensemble des tâches et par techniques (c) (expérimentation #3) 249
Figure 135 : Typologie des cartes résultantes des phases d'expérimentation cartographique de la thèse 261
Figure 136 : Méthode de calcul des dimensions des mailles pour 3 niveaux successifs (a) et emboitement en z des mailles pour ces 3 niveaux (b)..... 269

Figure 137 : Emboitement des mailles carrées (a) et des mailles hexagonales (b) 269
Figure 138 : Imbrication multiscalaire des carroyages hexagonaux 271
Figure 139 : Exemple d'agrégation à travers 3 échelles cartographiques, de l'échelle synoptique à celle du quartier 272
Figure 140 : Cartographie intégrée d'un territoire cycloné 276
Figure 141 : Suivi de la reconstruction post-Irma (Sept. 2017) sur Saint-Martin (Fr) de mars 2018 à mars 2019 277
Figure 142 : Le transfert des connaissances pour l'information préventive (RisCrises, 2020) 279
Figure 143 : Niveaux d'affichage cartographique de l'aléa et des conséquences du cyclone Irma (2017), de la Caraïbe à Saint-Martin 284
Figure 144 : Déploiement d'une machine virtuelle pour le fonctionnement du triptyque open source 288
Figure 145 : Première version du démonstrateur web cartographique dynamique et interactive appliquée au cadre de la DECI 294
Figure 146 : Cheminement de l'incertitude dans le système générique de l'information (adapté de Pang et al., 1997; Riveiro, 2007; Wittenbrink et al., 1996) 297
Figure 147 : Cheminement de l'incertitude dans la cartographie des dommages post-catastrophes 299
Figure 148 : Variables visuelles applicables à la représentation de l'incertitude (MacEachren et al., 2012) 303
Figure 149 : Espace de brouillard (Moriarty, 2017) 307
Figure 150 : Schéma de l'intégration du brouillard aux grandes échelles lors des phases d'évaluation des dommages pour représenter l'incertitude attributaire liée à la confrontation de deux jeux de données 308
Figure 151 : Évaluation des dommages et représentation de l'incertitude attributaire à partir des blocs de bâtiments 309
Figure 152 : Évaluation des dommages et représentation de l'incertitude attributaire à partir des surfaces maillées 309
Figure 153 : Schéma de fonctionnement du géo-indicateur multi-échelle 319

Liste des tableaux

Tableau 1 : Typologie de la carte en fonction des besoins et des usages (Poidevin, 1999) 24
Tableau 2 : Sept points majeurs définissant une crise et leurs implications 32
Tableau 3 : Typologie des principales familles de cartes relatives à l'évaluation et à la gestion des risques naturels (adaptée de Leone et al., 2010) 36
Tableau 4 : A gauche, classification des dommages issue de l'échelle macrosismique européenne (EMS-1998) ; à droite, exemple des niveaux de dommage issu du Guide du JRC (Source : Rapport final du stage 03EMSN049, 2018) 55
Tableau 5 : Type de mémoire et différenciations 67
Tableau 6 : Critères d'identification de la carte recensée 101
Tableau 7 : Critères d'identification de l'information sur l'(les) aléa(s) 102
Tableau 8 : Critères d'extraction des signes graphiques des dommages représentés 103
Tableau 9 : Informations de second plan et habillage de la carte 103
Tableau 10 : Analyse du texte et de la légende 104
Tableau 11 : Techniques d'agrégation des dommages utilisées par les SEM 114
Tableau 12 : Exemple de classification de 1er ordre et de second ordre à partir de réponses ouvertes 193
Tableau 13 : Pourcentage moyen de bonnes réponses (T3.1-1) et de mauvaises réponses (T3.1-2) par niveau cartographique (a) et par catégorie d'acteurs (b) (expérimentation #2) 205
Tableau 14 : Pourcentage moyen de bonnes réponses [T3.2-1] et de mauvaises réponses [T3.2-2] par niveau cartographique (a) et par catégorie d'acteurs (b) (expérimentation #2) 206
Tableau 15 : Secteurs géographiques et jeux de données utilisés pour l'expérimentation #3 229
Tableau 16 : Résultats généraux des expérimentations #2 et #3 reprenant les tâches à accomplir (a), les spécificités des expérimentations (b) et la perception utilisateur (c) 257
Tableau 17 : Forces et faiblesses des protocoles expérimentaux et pistes d'améliorations et perspectives 266
Tableau 18 : Paramètres spécifiques à la diffusion mondiale web Mercator (EPSG : 3857) 270
Tableau 19 : Configuration de la table de points pour la discrétisation des données 291
Tableau 20 : Table attributaire en sortie d'algorithme 291
Tableau 21 : Termes et définitions générales pour les catégories d'incertitudes (modifié par Thomson et al., 2005) 296

Liste des annexes

Expérimentation #1

Annexe 1 : Expérimentation #1 - Questionnaire type de la phase d'analyse individuel des cartes .. 352
Annexe 2 : Expérimentation #1 - Questionnaire type de la phase d'analyse collective des cartes .. 353

Expérimentation #2

Annexe 3 : Expérimentation #2 - Questionnaire profil utilisateur 354
Annexe 4 : Expérimentation #2 - Questionnaire type de la phase d'analyse visuel & individuel des cartes 355
Annexe 5 : Expérimentation #2 - Fond de carte type de la phase de mémorisation des zones les plus touchés des cartes 356
Annexe 6 : Expérimentation #2 - Questionnaire type de la phase d'analyse collective des cartes .. 357
Annexe 7 : Expérimentation #2 - Représentations analysées lors de la phase d'analyse visuelle des cartes 358

Expérimentation #3

Annexe 8 : Expérimentation #3 - Questionnaire type de la phase d'analyse visuel des cartes 360
Annexe 9 : Expérimentation #3 - Représentations analysées lors de la phase d'analyse visuelle des cartes 361

Annexes

Annexe 1 : Expérimentation #1 - Questionnaire type de la phase d'analyse individuel des cartes

Nom / Prénom :	

ANALYSE INDIVIDUELLE DES CARTES

A quoi sert cette carte ?				
Délimiter les zones & Nommer le(s) secteur(s) le(s) plus touché(s) ? : *Localiser les zones touchées en vous aidant des informations qui sont présentes sur la carte*				
Estimer le niveau de dommages pour la/les zone(s) les plus touchées				
Estimer la quantité de dommages pour la/les zone(s) les plus touchées				

Vectoriser les zones plus touchées au sein du cadre d'étude :

1. Vectoriser les zones les plus touchées
2. Enregistrer la couche vecteur par un intitulé « zone_touche_*suivi du numéro de la carte analysée* » dans le dossier analyse_individuelle_nom_prenom_2019.

Êtes-vous sûr d'avoir identifié les zones les plus touchées ? :	*Tout à fait sûr*	*Sûr*	*Ni sûr, ni pas sûr*	*Pas sûr*	*Pas du tout sûr*
Pourquoi ? :					
Comment considérez-vous la lecture de la carte ? :	*Très facile*	*Facile*	*Ni facile, ni pas facile*	*Pas facile*	*Pas du tout facile*
Pourquoi ? :					

Annexe 2 : Expérimentation #1 - Questionnaire type de la phase d'analyse collective des cartes

Nom / Prénom :	

ANALYSE COLLECTIVE DES CARTES

En analysant l'ensemble des cartes, délimiter le ou les secteur(s) et nommer les secteurs les plus touchées : *Localiser les zones touchées en vous aidant des informations qui sont présentes sur l'ensemble des cartes*				
Estimer le niveau de dommages pour la/les zone(s) les plus touchées				
Estimer la quantité de dommages pour la/les zone(s) les plus touchées				

Vectoriser les zones plus touchées :

1. Vectoriser les zones les plus touchées
2. Enregistrer la couche vecteur par un intitulé « zone_touche_analyse_globale » dans le dossier : analyse_globale_nom_prenom_2019

Pensez-vous être sûr d'avoir identifié les zones les plus touchées ? :	*Tout à fait sûr*	*Sûr*	*Ni sûr, ni pas sûr*	*Pas sûr*	*Pas du tout sûr*
Pourquoi ? :					
Quels sont les éléments qui vous ont permis de localiser les informations demandées ? :					
Classer les cartes par représentations les plus efficaces : utiliser le numéro de la carte					

Annexe 3 : Expérimentation #2 – Questionnaire profil utilisateur

Cette expérimentation est réalisée dans le cadre d'un travail de recherche doctorale. Les informations que vous fournirez feront l'objet d'un travail statistique et votre nom ne sera pas cité. Cependant, si vous le désirez les résultats pourront vous être communiqués. Pour cela, veillez à fournir votre courriel dans la case « nom et prénom ».

Rangée de l'amphi #.....

Nom / Prénom :	
Genre / année de naissance	
Quelle est votre catégorie :	☐ *Décideurs (locaux, institutionnels)* ☐ *Force de secours* ☐ *Force de l'ordre* ☐ *Scientifique* ☐ *Autres : précisez…*
Depuis combien de temps travaillez-vous dans ce domaine ?	
Comment définiriez-vous votre niveau de connaissance en cartographie ?	☐ *Non défini* ☐ *Novice* ☐ *Suffisant* ☐ *Bon* ☐ *Excellent*
Quelles sont les utilisations de la carte dans votre métier ?	
Selon vous, quels sont les principaux usages des produits cartographiques diffusés par les services de cartographies rapides ?	
Selon vous, quels éléments doivent apparaitre sur une carte des dommages post-catastrophes ?	
Quels supports vous semblent les plus intéressants et essentiels aujourd'hui ?	☐ *Support papier* ☐ *Support numérique adaptable aux formats des écrans (Smartphone, PC, tablette, etc.)* ☐ *Support numérique projetable (type PPT, PDF) ;* ☐ *Support numérique interactif*
Avez-vous des contraintes visuelles : troubles de la vision ou des couleurs ?	

Annexe 4 : Expérimentation #2 - Questionnaire type de la phase d'analyse visuel & individuel des cartes

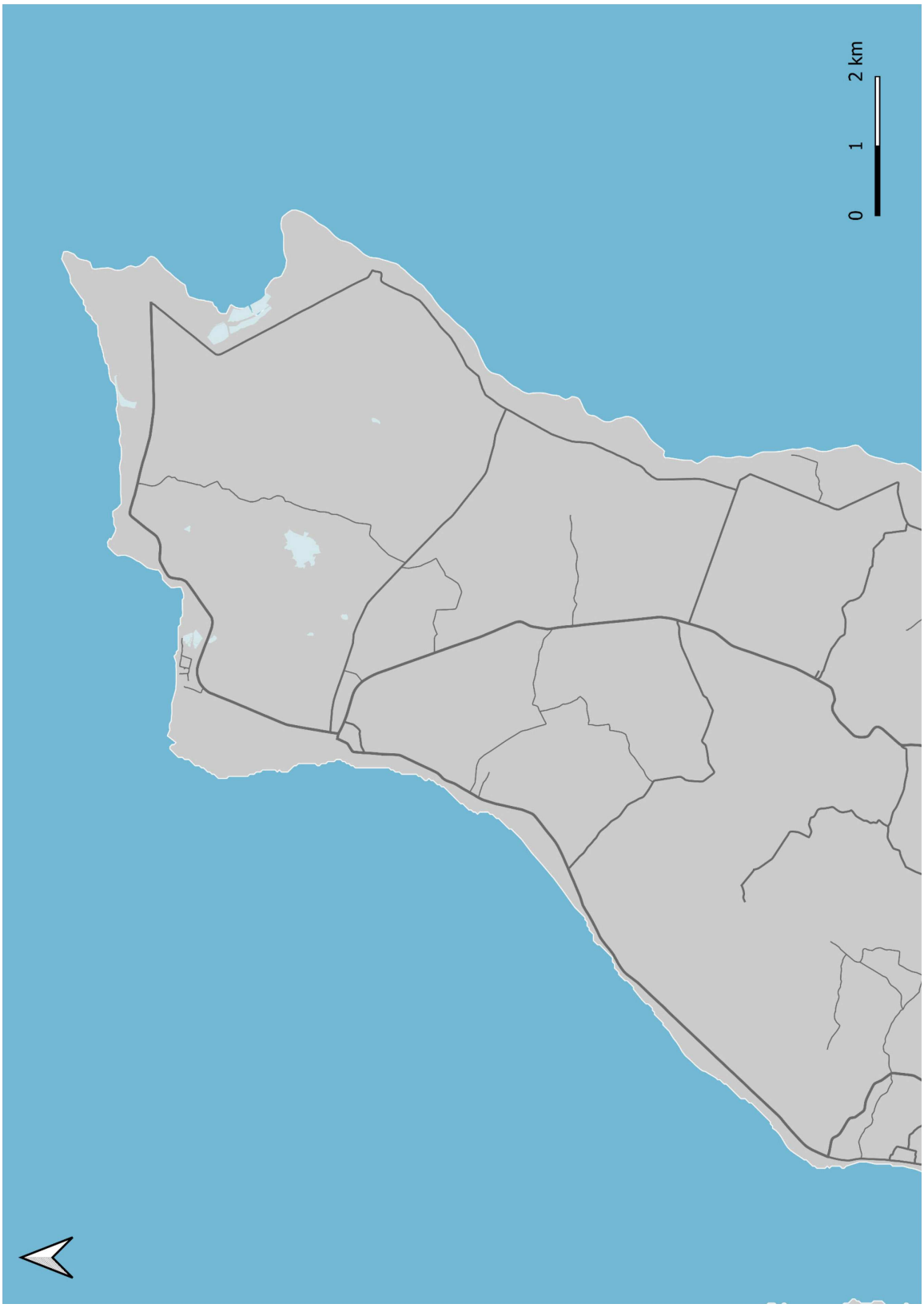
ANALYSE INDIVIDUELLE DES CARTES

À la suite de quel type d'événement a été produite cette carte ?	
Comment sont représentés les dommages ?	
Nommer le(s) secteur(s) le(s) plus touché(s) (en s'aidant des toponymes)	
Nommer le(s) secteur(s) le(s) moins touchées (en s'aidant des toponymes)	

Estimer le niveau de dommages et le quantité de bâtiments touchés pour la zone suivante :	***Niveau de dommage :***	***Nombre de bâtiment***
H		☐ *Peu* ☐ *Moyen* ☐ *Beaucoup*

Annexe 5 : Expérimentation #2 - Fond de carte type de la phase de mémorisation des zones les plus touchés des cartes

Dessiner de mémoire le(s) secteur(s) que vous avez identifiés comme étant le(s) plus touché(s) sur le fond de carte ci-dessous :



Annexe 6 : Expérimentation #2 - Questionnaire type de la phase d'analyse collective des cartes

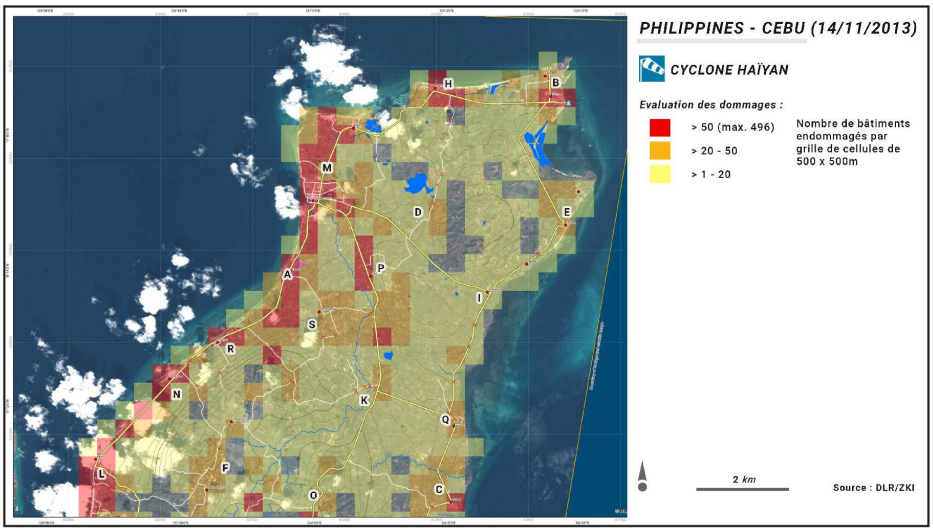
TOUTES CARTES CONFONDUES (répondre en fin de session)

Il s'agit de noter de 1 à 5 (1 : très mauvais, 2 : mauvais, 3 : moyen, 4 : bon et 5 : très bon) les critères ci-dessous pour chacune des cartes présentées :

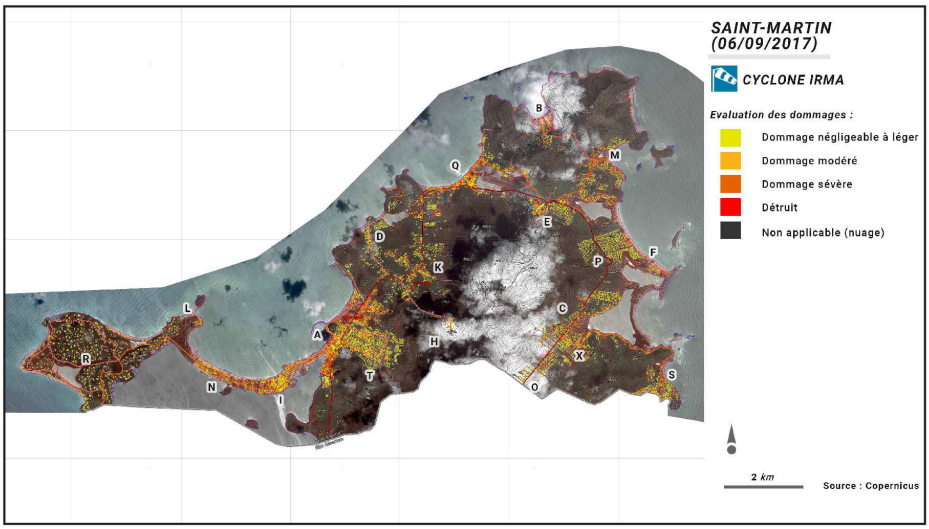
Numéro des cartes	***Carte 1***	***Carte 2***	***Carte 3***	***Carte 4***	***Carte 5***	***Carte 6***
Efficacité visuelle de la représentation des dommages :						
Charge d'information :						
Utilité des informations en arrière-plan :						
Qualifier votre niveau de confiance dans l'analyse de la carte						

Annexe 7 : Expérimentation #2 – Représentations analysées lors de la phase d'analyse visuelle des cartes

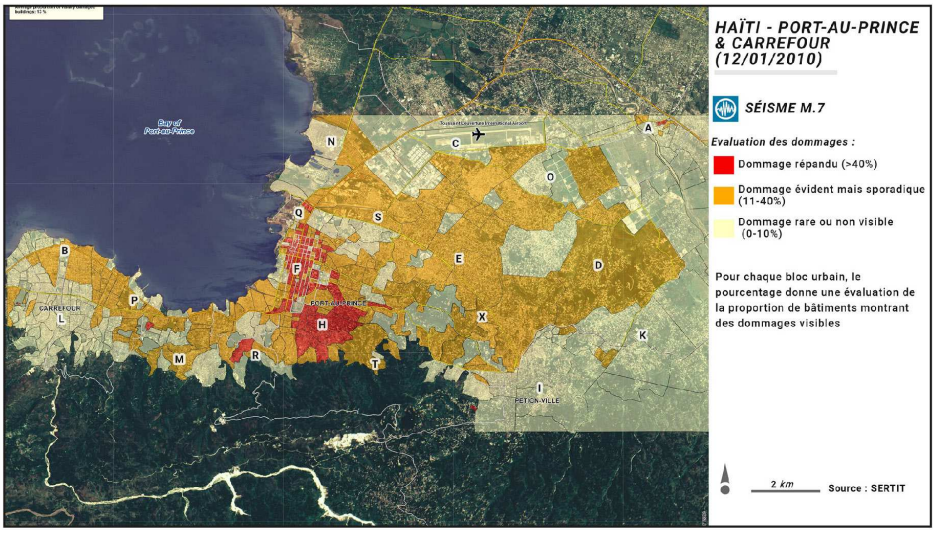
Carte #1



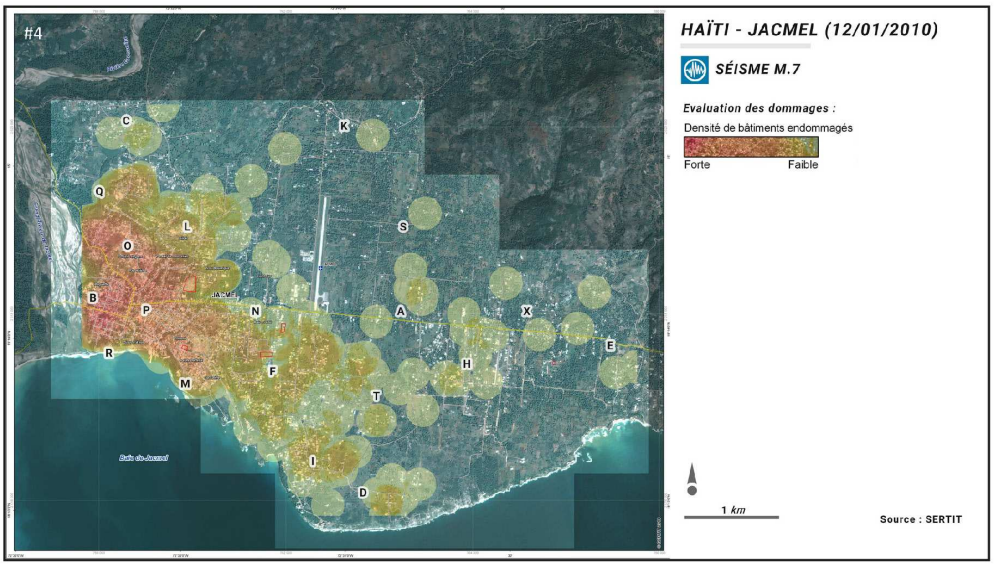
Carte #2



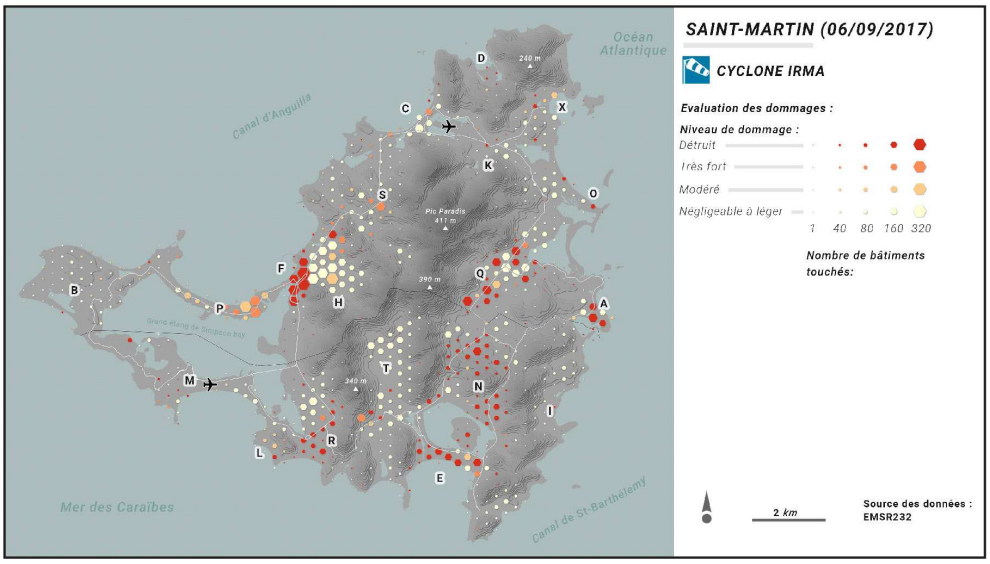
Carte #3



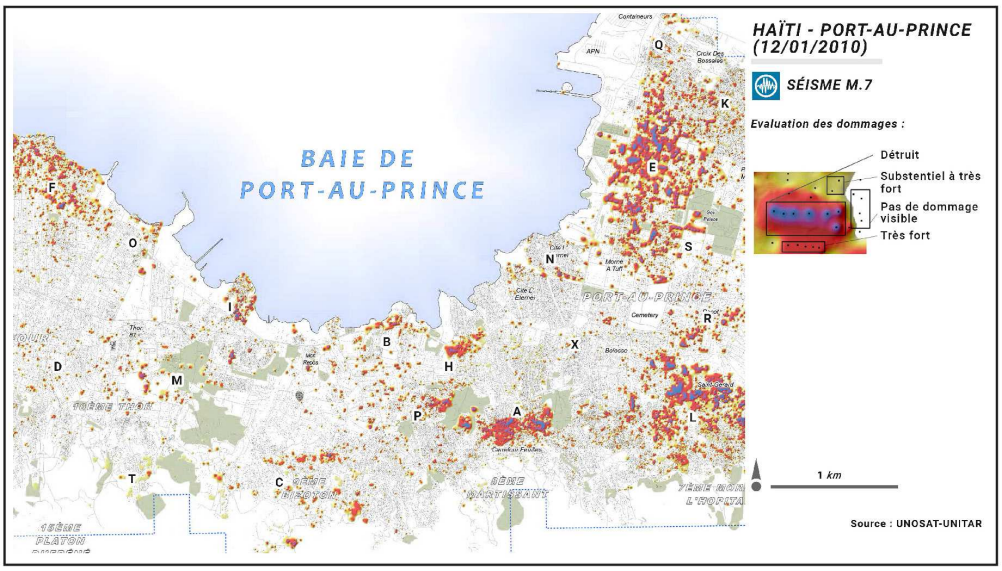
Carte #4



Carte #5



Carte #6



Annexe 8 : Expérimentation #3 - Questionnaire type de la phase d'analyse visuel des cartes

Nom / Prénom :	
Genre / âge	

ANALYSE INDIVIDUELLE DES CARTES

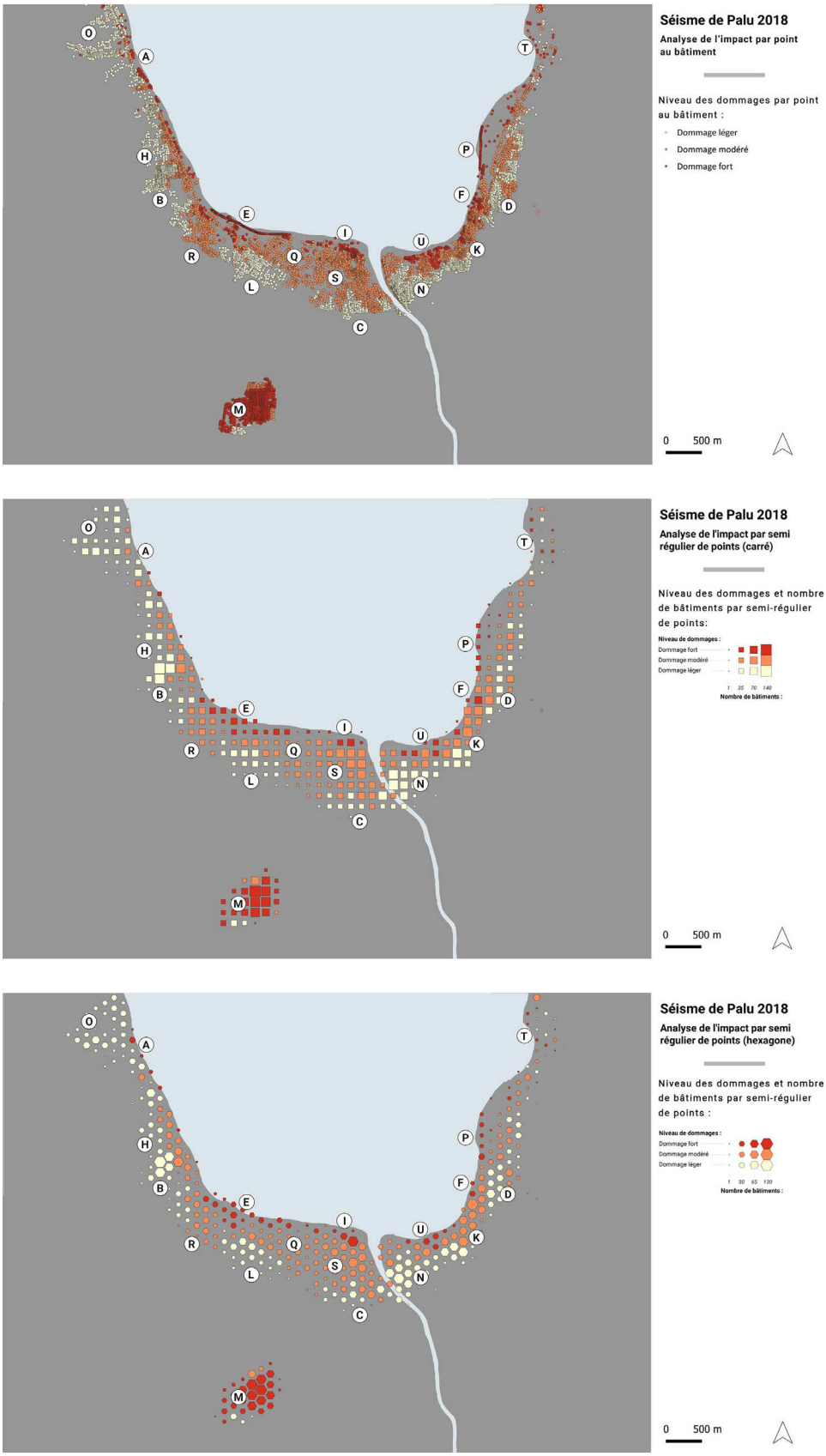
Localiser et nommer les (k) régions où les dommages sont élevés pour une grande quantité de bâtiments :	
Localiser et nommer les (k) régions où les dommages sont élevés pour une faible quantité de bâtiments :	
Estimer le niveau de dommages pour la région (r)	
Estimer la quantité de bâtiments endommagés pour la région (r)	

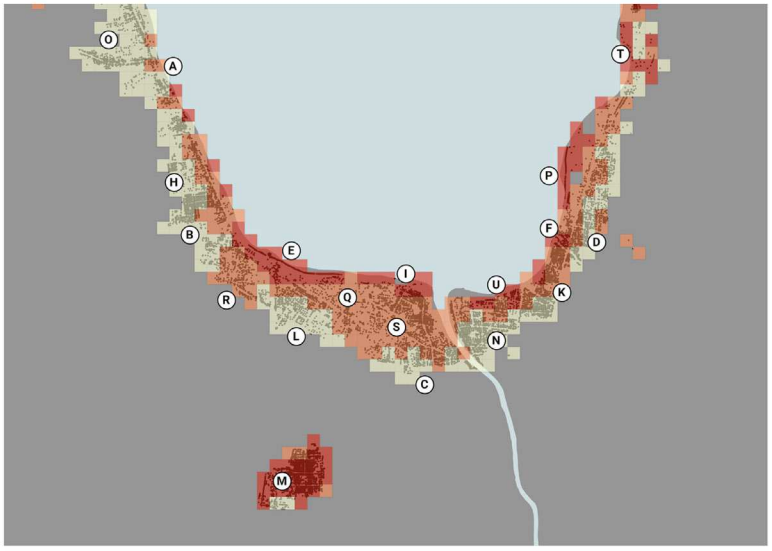
TOUTES TECHNIQUES CONFONDUES (répondre en fin de session)

Il s'agit de noter de 1 à 5 (1 : très mauvais, 2 : mauvais, 3 : moyen, 4 : bon et 5 : très bon) les critères ci-dessous pour chacune des techniques présentées :

Techniques	***Point***	***Semi-réguliers de points carré***	***Semi-réguliers de points hex.***	***Carroyage Carré***	***Carroyage hex.***	***Interpolation***
Efficacité						
Esthétisme						
Rapport entre efficacité/esthétisme						

Annexe 9 : Expérimentation #3 - Représentations analysées lors de la phase d'analyse visuelle des cartes





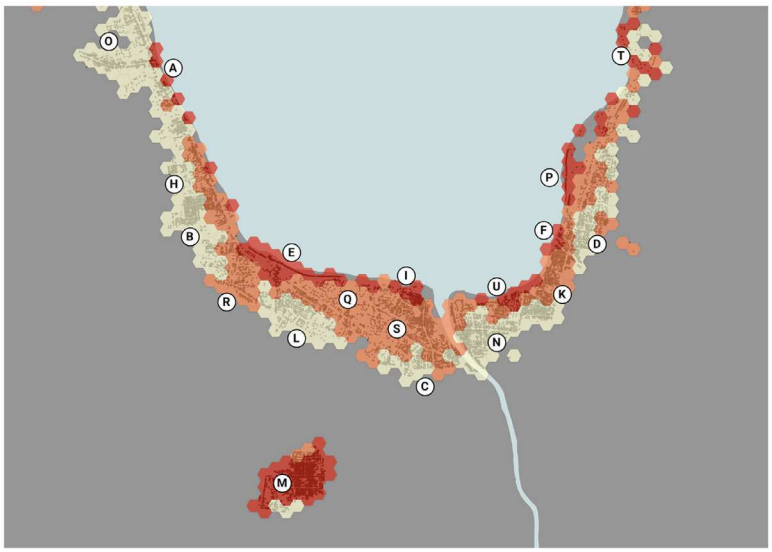
Séisme de Palu 2018

Analyse de l'impact par carroyage (carré)

Niveau des dommages par maille :

- Dommage léger
- Dommage modéré
- Dommage fort
- Bâtiment

0 500 m



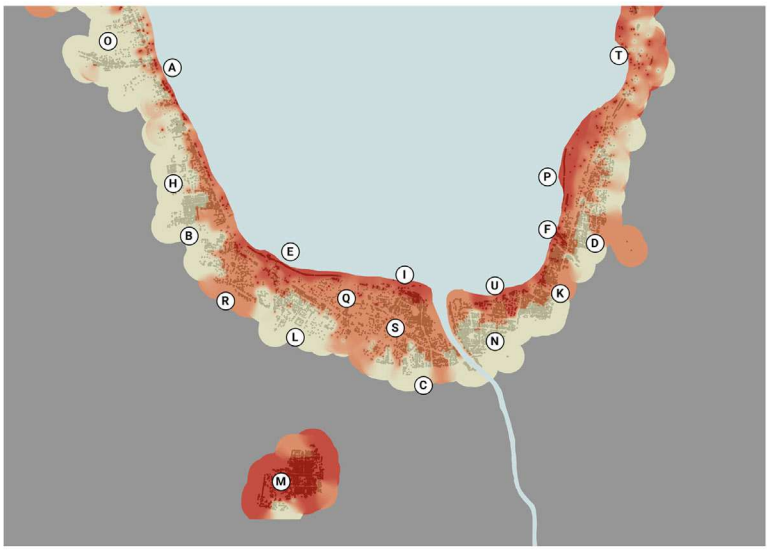
Séisme de Palu 2018

Analyse de l'impact par carroyage (hexagone)

Niveau des dommages par maille :

- Dommage léger
- Dommage modéré
- Dommage fort
- Bâtiment

0 500 m



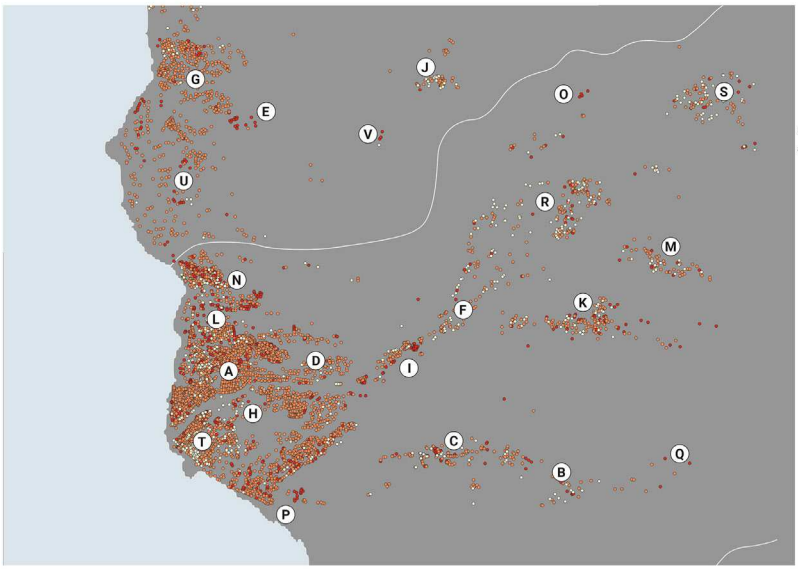
Séisme de Palu 2018

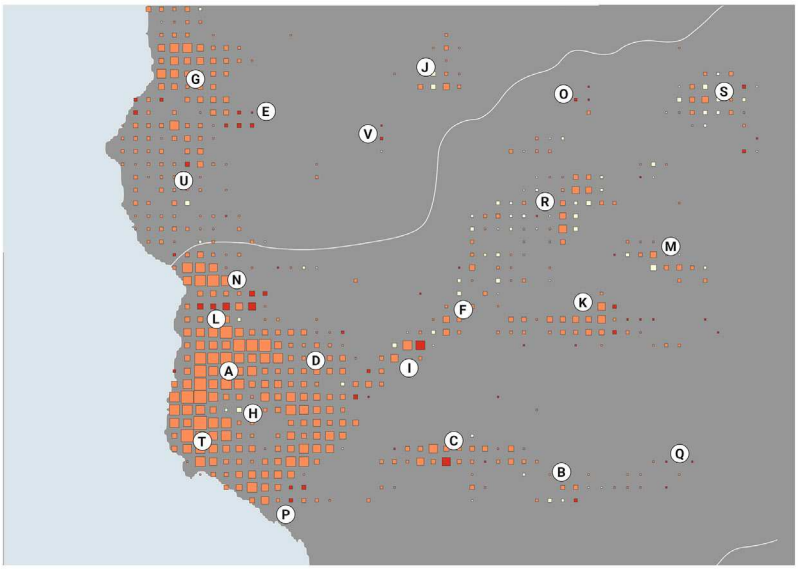
Analyse de l'impact par interpolation de surface

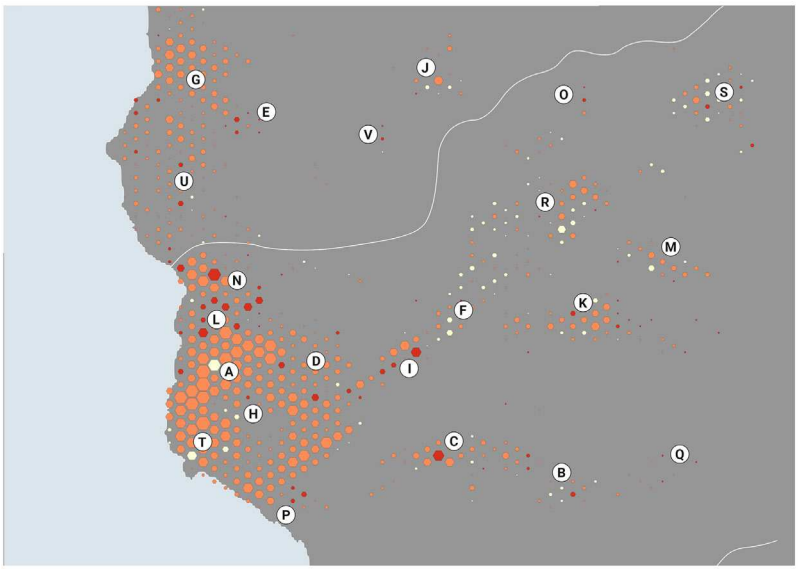
Interpolation des dommages :

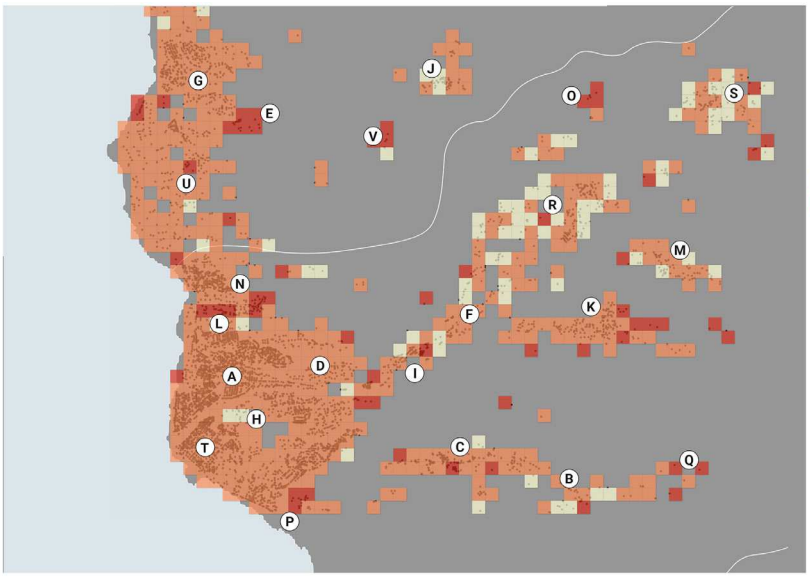
- Dommage léger
- Dommage modéré
- Dommage fort
- Bâtiment

0 500 m


Cyclone Dominique 2017
Analyse de l'impact par point au bâtiment
Niveau des dommages par point au bâtiment :
Dommage modéré
Dommage fort
0
500 m


Cyclone Dominique 2017
Analyse de l'impact par semi régulier de points (carré)
Niveau des dommages et nombre de bâtiments par semi-régulier de points:
Niveau de dommages :
Dommage fort
Dommage modéré
Dommage léger
1 15 30 60
Nombre de bâtiments :
0
500 m


Cyclone Dominique 2017
Analyse de l'impact par semi régulier de points (hexagone)
Niveau des dommages et nombre de bâtiments par semi-régulier de points :
Niveau de dommages :
Dommage fort
Dommage modéré
Dommage léger
1 10 25 50
Nombre de bâtiments :
0
500 m



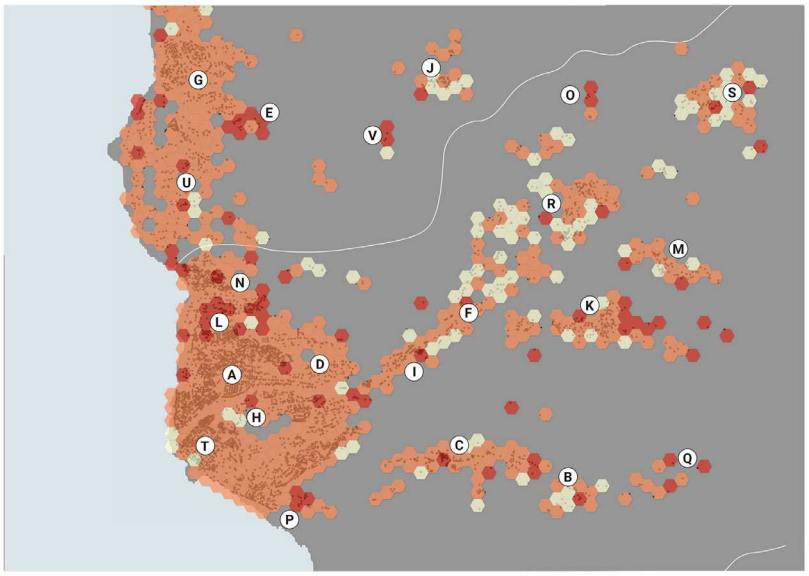
Cyclone Dominique 2017

Analyse de l'impact par carroyage (carré)

Niveau des dommages par maille :

- Dommage léger
- Dommage modéré
- Dommage fort
- Bâtiment

0 500 m



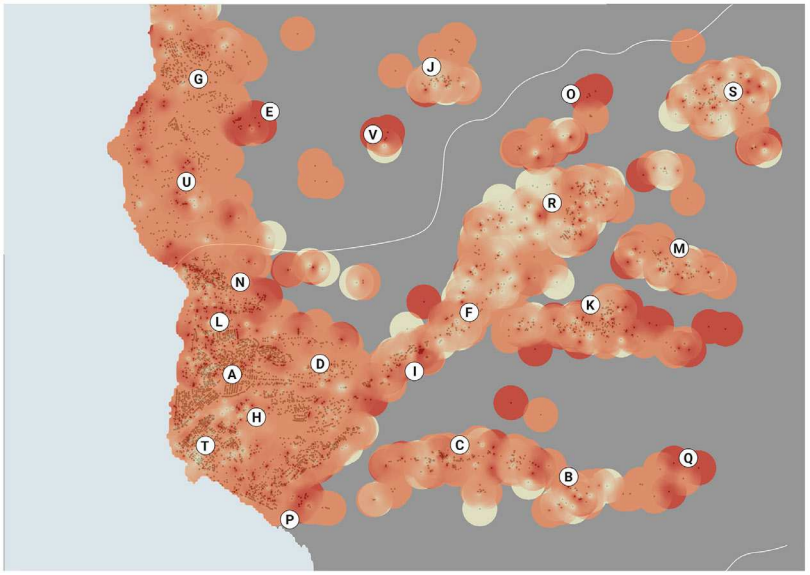
Cyclone Dominique 2017

Analyse de l'impact par carroyage (hexagone)

Niveau des dommages par maille :

- Dommage léger
- Dommage modéré
- Dommage fort
- Bâtiment

0 500 m



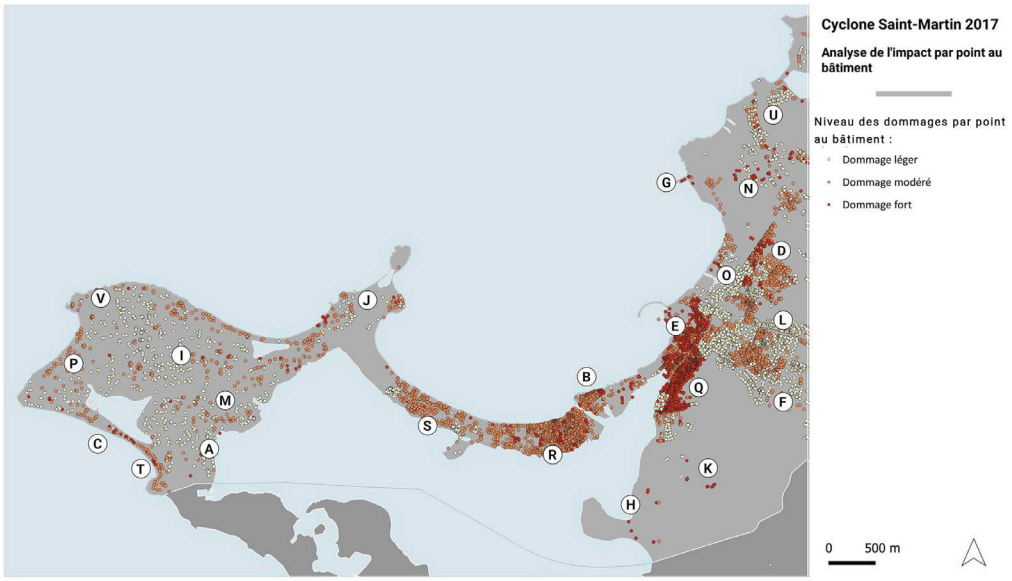
Cyclone Dominique 2017

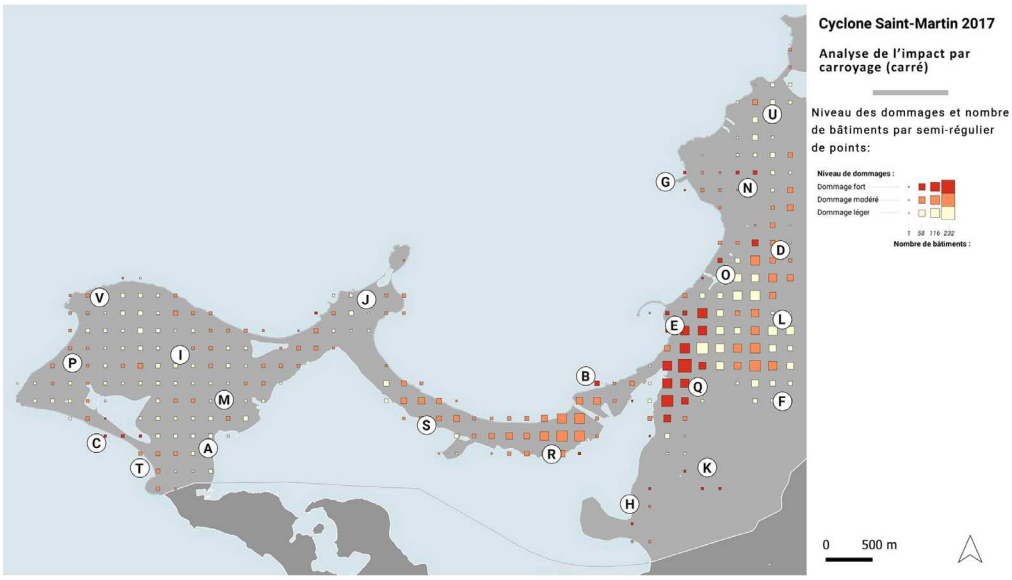
Analyse de l'impact par interpolation de surface

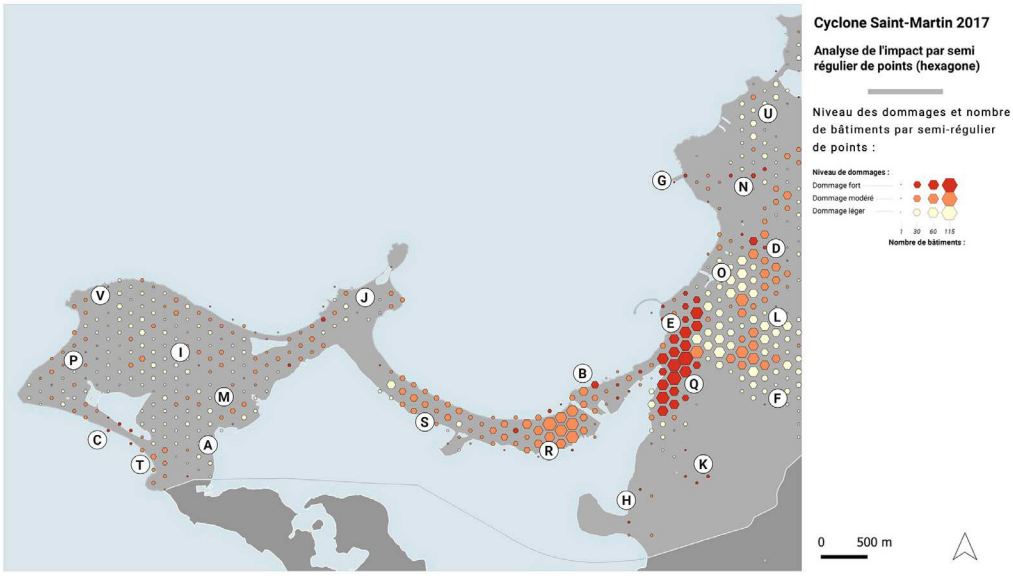
Interpolation des dommages :

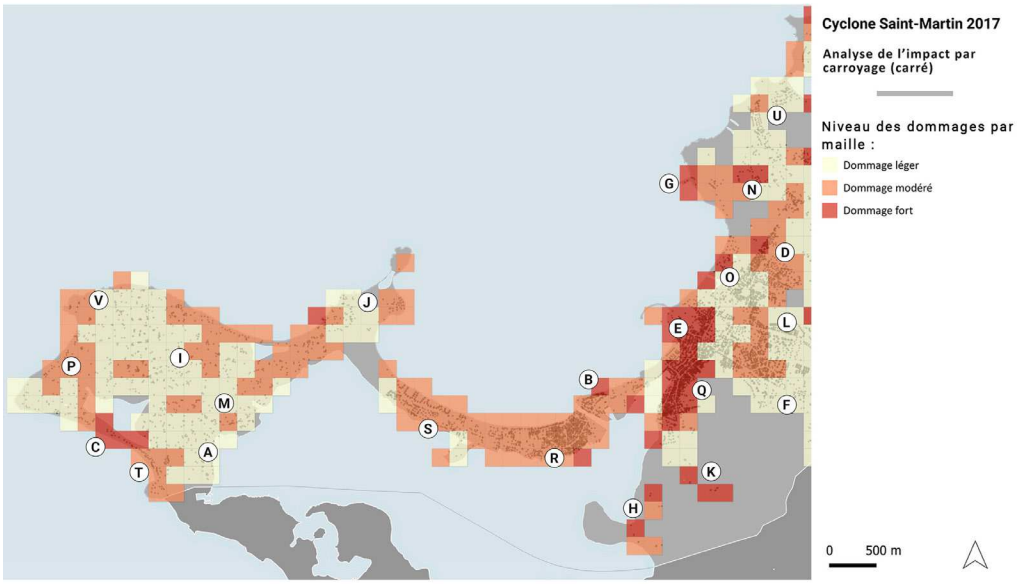
- Dommage léger
- Dommage modéré
- Dommage fort
- Bâtiment

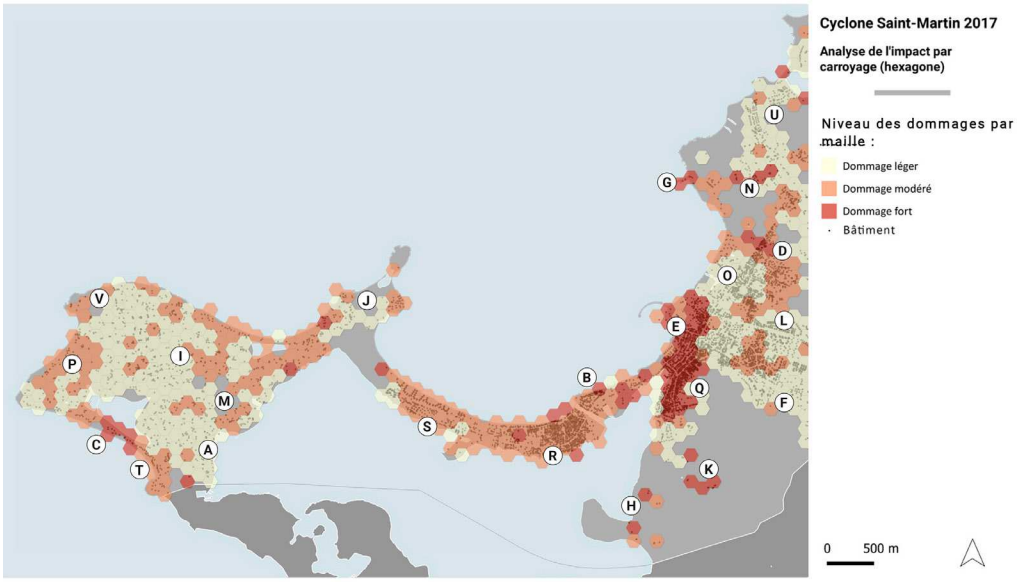
0 500 m

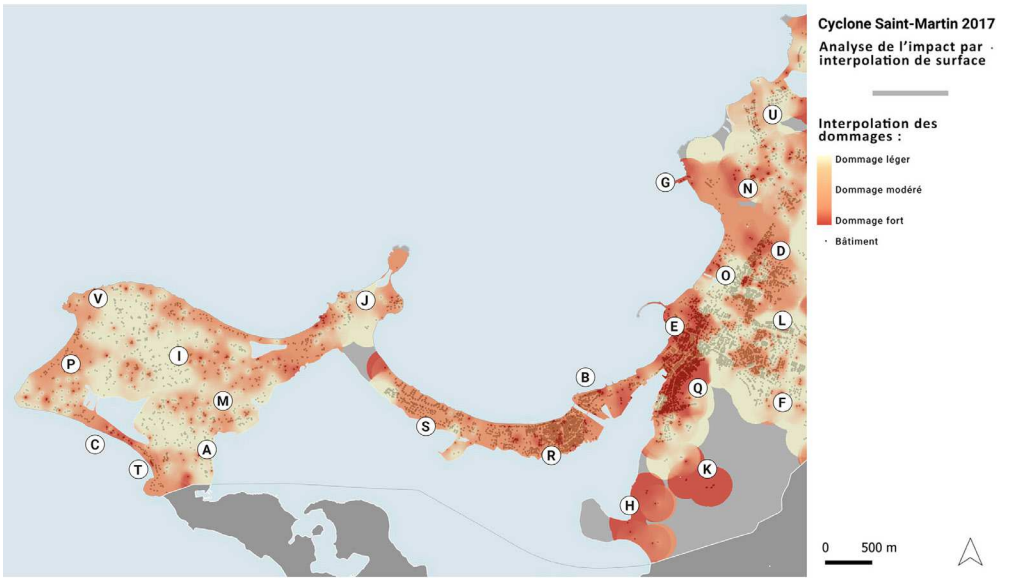

Cyclone Saint-Martin 2017
Analyse de l'impact par point au bâtiment
Niveau des dommages par point au bâtiment :
Dommage léger
Dommage modéré
Dommage fort
0
500 m

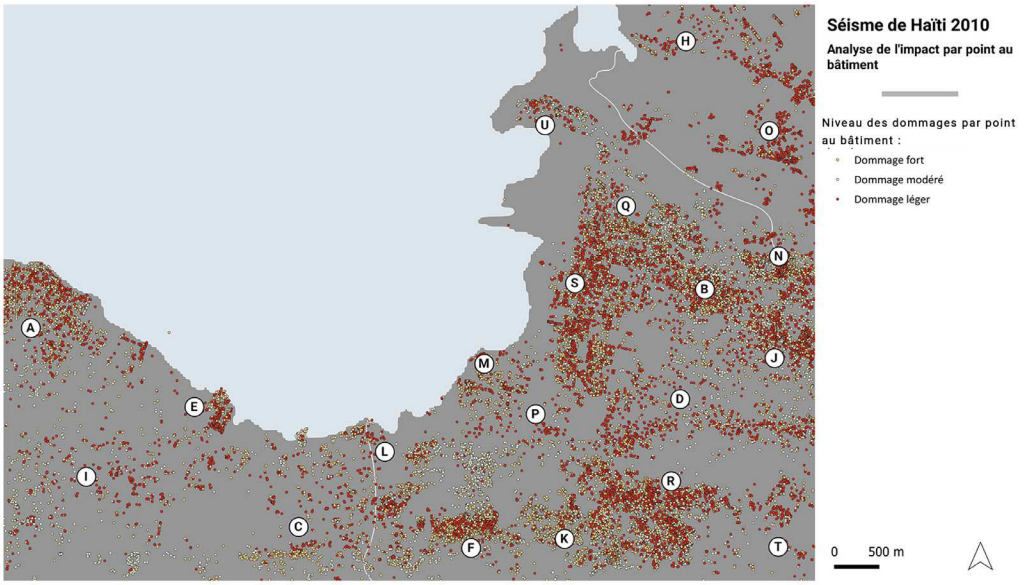

Cyclone Saint-Martin 2017
Analyse de l'impact par carroyage (carré)
Niveau des dommages et nombre de bâtiments par semi-régulier de points:
Niveau de dommages :
Dommage fort
Dommage modéré
Dommage léger
1 58 116 232
Nombre de bâtiments :
0
500 m

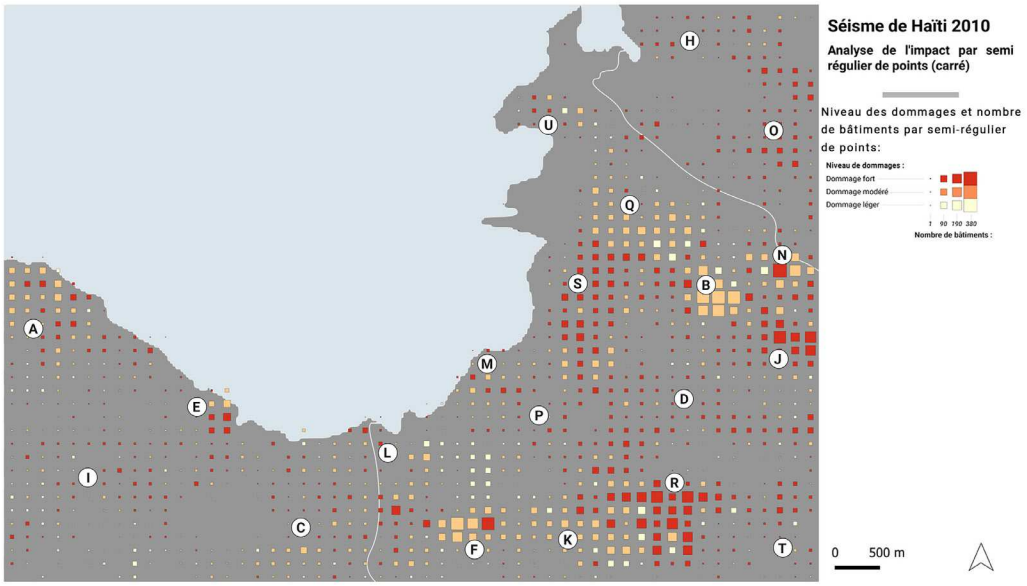

Cyclone Saint-Martin 2017
Analyse de l'impact par semi régulier de points (hexagone)
Niveau des dommages et nombre de bâtiments par semi-régulier de points :
Niveau de dommages :
Dommage fort
Dommage modéré
Dommage léger
1 30 60 115
Nombre de bâtiments :
0
500 m

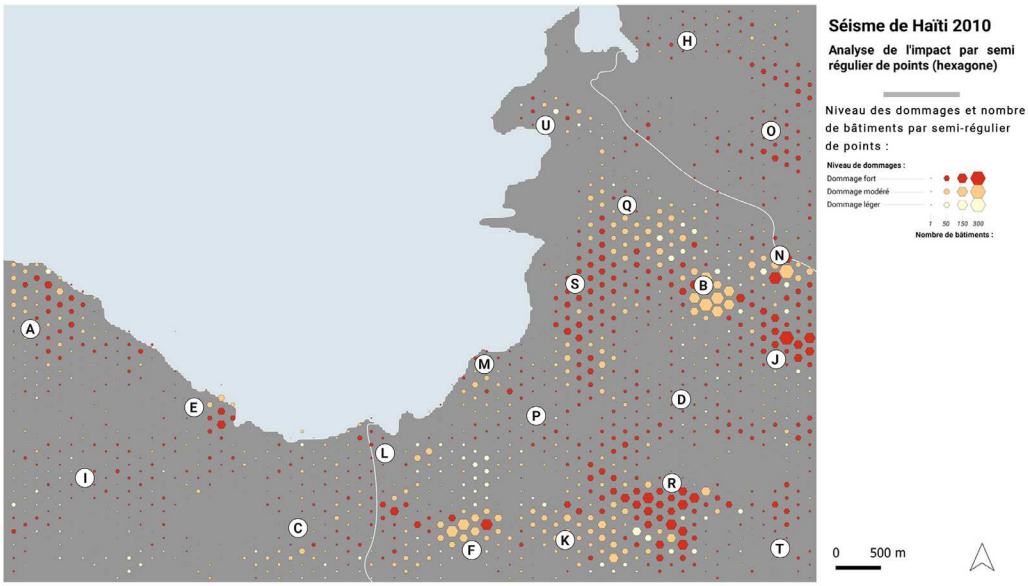

Cyclone Saint-Martin 2017
Analyse de l'impact par carroyage (carré)
Niveau des dommages par maille :
Dommage léger
Dommage modéré
Dommage fort
0
500 m

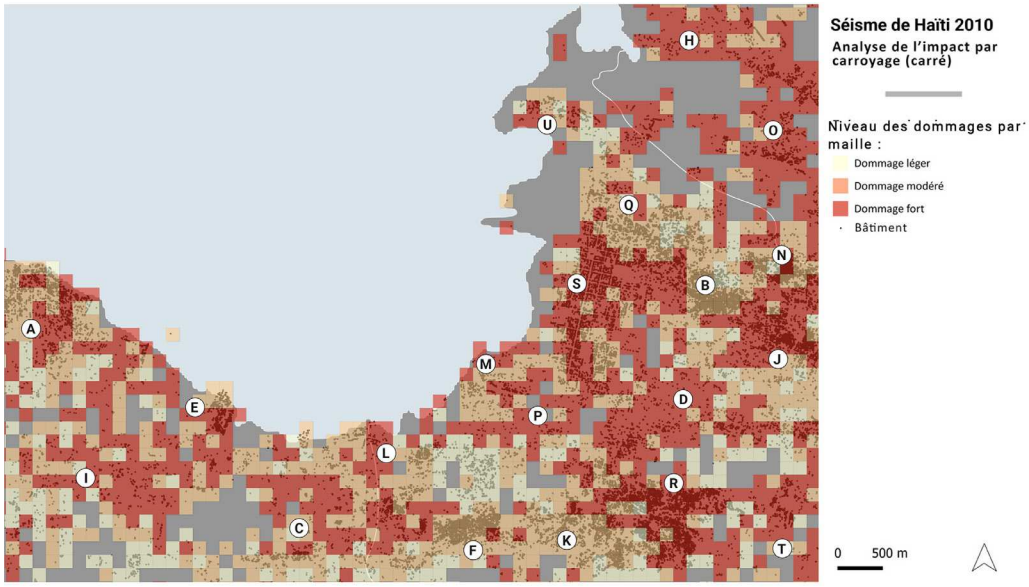

Cyclone Saint-Martin 2017
Analyse de l'impact par carroyage (hexagone)
Niveau des dommages par maille :
Dommage léger
Dommage modéré
Dommage fort
Bâtiment
0
500 m

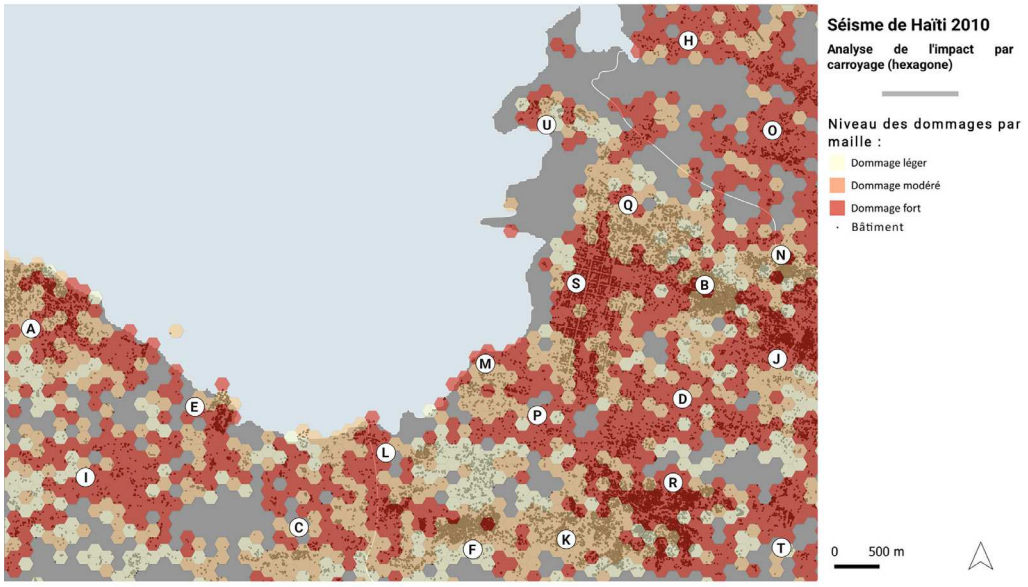

Cyclone Saint-Martin 2017
Analyse de l'impact par interpolation de surface
Interpolation des dommages :
Dommage léger
Dommage modéré
Dommage fort
Bâtiment
0
500 m

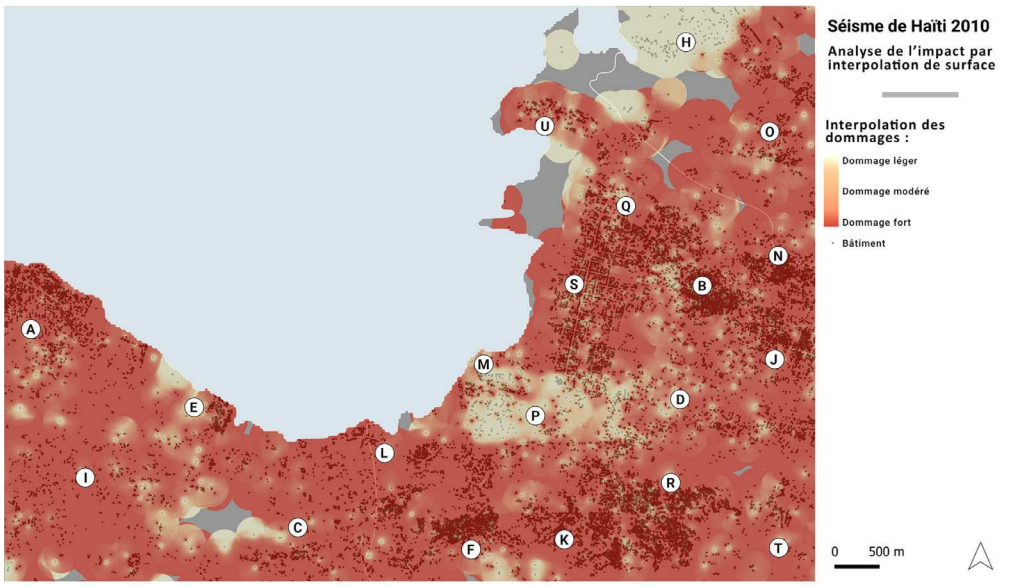

Séisme de Haïti 2010
Analyse de l'impact par point au bâtiment
Niveau des dommages par point au bâtiment :
Dommage fort
Dommage modéré
Dommage léger
0
500 m


Séisme de Haïti 2010
Analyse de l'impact par semi régulier de points (carré)
Niveau des dommages et nombre de bâtiments par semi-régulier de points:
Niveau de dommages :
Dommage fort
Dommage modéré
Dommage léger
1 90 190 380
Nombre de bâtiments :
0
500 m


Séisme de Haïti 2010
Analyse de l'impact par semi régulier de points (hexagone)
Niveau des dommages et nombre de bâtiments par semi-régulier de points :
Niveau de dommages :
Dommage fort
Dommage modéré
Dommage léger
1 50 150 300
Nombre de bâtiments :
0
500 m


Séisme de Haïti 2010
Analyse de l'impact par carroyage (carré)
Niveau des dommages par maille :
Dommage léger
Dommage modéré
Dommage fort
Bâtiment
0
500 m


Séisme de Haïti 2010
Analyse de l'impact par carroyage (hexagone)
Niveau des dommages par maille :
Dommage léger
Dommage modéré
Dommage fort
Bâtiment
0
500 m


Séisme de Haïti 2010
Analyse de l'impact par interpolation de surface
Interpolation des dommages :
Dommage léger
Dommage modéré
Dommage fort
Bâtiment
0
500 m