Généralisation de représentations intermédiaires dans une carte topographique multi-échelle pour faciliter la navigation de l'utilisateur

Marion Dumont

▶ **To cite this version:**

Marion Dumont. Généralisation de représentations intermédiaires dans une carte topographique multi-échelle pour faciliter la navigation de l'utilisateur. Géographie. Université Paris-Est, 2018. Français. NNT : 2018PESC1076 . tel-01935783

HAL Id: tel-01935783
https://theses.hal.science/tel-01935783

Submitted on 27 Nov 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ PARIS-EST

ÉCOLE DOCTORALE UNIVERSITÉ PARIS-EST Mathématiques et STIC

IGN INSTITUT NATIONAL DE L'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE ET FORESTIÈRE

COGIT CARTOGRAPHIE ET GÉOMATIQUE

Thèse de doctorat

Spécialité Sciences et Technologies de l'Information Géographique

Généralisation de représentations intermédiaires dans une carte topographique multi-échelle pour faciliter la navigation de l'utilisateur

Marion Dumont

Soutenue publiquement le 18 juin 2018 devant le jury composé de :

Sara Irina FABRIKANT, Professeur, Université de Zurich	Rapporteur
Jean-Daniel FEKETE, Directeur de recherche, HDR, INRIA	Rapporteur
Caroline APPERT, Chargée de recherche, HDR, CNRS	Examinateur
Pia BEREUTER, Professeur, FNHW Switzerland	Examinateur
Anne RUAS, Directrice de recherche, HDR, IFSTTAR	Présidente du Jury
Cécile DUCHENE, Enseignant-Chercheur, HDR, IGN	Directrice de thèse
Guillaume TOUYA, Directeur de recherche, HDR, IGN	Directeur de thèse

Université Paris-Est - École Doctorale MSTIC
Institut National de l'Information Géographique et Forestière – LaSTIG/COGIT

Cette thèse a été financée par le projet ANR MapMuxing [ANR-14-CE24-0011-01] et réalisée entre 2014 et 2018, au sein de l'équipe COGIT (Cartographie et Géomatique) du laboratoire LaSTIG de l'IGN, sous la direction de Cécile Duchêne et Guillaume Touya.

Remerciements

J'adresse mes remerciements à tous les membres du jury, pour avoir accepté d'évaluer ce travail de thèse. Merci aux rapporteurs, Sara Fabrikant et Jean-Daniel Fekete, d'avoir su porter sur ces travaux un regard critique et constructif, qui m'a permis d'affiner les justifications de mes travaux et de valoriser mes résultats. Merci également aux examinatrices, Caroline Appert, Pia Bereuter et Anne Ruas, et à l'ensemble du jury pour leur intérêt et leur bienveillance à l'égard de ces travaux. Les discussions et points de vue que nous avons pu partager pendant et après la soutenance ont été source d'une grande satisfaction personnelle, car enfin, j'ai vu ma contribution s'inscrire pour de vrai dans ce grand ensemble de travaux passionnants qui composaient mon état de l'art.

Merci à Sébastien Mustière d'avoir accepté de diriger initialement cette thèse, et de l'avoir conseillée ensuite. Un très grand merci à Cécile Duchêne d'avoir dirigé cette thèse. Ta rigueur et ton sens de la science m'impressionnent toujours, quel que soit le domaine. Ce fut un plaisir et un honneur de faire cette thèse avec toi. Guillaume, je le redis et pourrais le redire encore mille fois : je n'en serais pas là sans toi, cette thèse et moi, on te doit beaucoup. MERCI !

Je tiens également à remercier mes collègues du projet ANR MapMuxing pour leur gentillesse, leur disponibilité et leur ouverture d'esprit. C'était une chance de participer à ce projet multidisciplinaire novateur et de découvrir vos domaines respectifs. Vos retours sur mes travaux ont toujours été très pertinents et constructifs, le tout dans une atmosphère particulièrement agréable. J'ai hâte de vous retrouver pour le séminaire de clôture ! Merci spécial à Emmanuel pour sa grande contribution à mon test utilisateurs !

Je souhaite également dire un grand merci à mes collègues du LaSTIG, qui depuis de nombreuses années maintenant, m'ont permis d'évoluer au sein de leur équipe, de stagiaire à docteure ! Ce fut un réel plaisir d'être à vos côtés, quotidiennement au travail en K200 puis K300, ou régulièrement à l'ENSG, ou plus exceptionnellement en conférences à Rio, Washington ou Helsinki. Merci à Alain, Anna, Didier, Emmanuel, Nicolas et Francis pour leur confiance dans le cadre de mon tutorat. Merci à Catherine, Marie-Dominique, Sébastien de m'avoir accueillie et guidée en stage, et de m'avoir donné goût à ce remue-méninge qu'est la recherche. Merci à Ana-Maria, Arnaud, Bertrand, Charlotte, Julien d'être des personnes à la fois bourrées de compétences scientifiques ET agréables à vivre. Merci à Abdel, Anna, Clément D., Colin, Jérémie, Maxime, Quy-Thy, Sébastien B., Stefan et Yann d'avoir partagé mes déboires de doctorante, il faut vraiment lancer ce club pour les prochaines générations ! Merci à Imran, Laurence, Mickaël, Nathalie puis Paul et Mattia d'avoir contribué à égailler mon bureau chaque jour, avec vos plantes (et moucherons), vos rires et vos discussions plus ou moins scientifiques ! Merci à Antoine et nos collègues du Matis (Alexandre, Bastien, Bruno, Clément M., David, Laman, Matthieu, Seb Gio, Tristan et tous les autres) pour m'avoir remonté le moral et bien changé les idées en salle café, avec vos conversations toutes plus bizarres les unes que les autres… Et enfin Sido : merci, merci et encore merci !

Merci à mes amis de m'avoir supporté, au sens propre comme au figuré, pendant ces 3 ans et demi. Je n'ai pas toujours été facile à vivre (avant comme pendant) et vous avez toujours été adorables. Merci à Amélie et Clément, Anna C., Anna M., Adri, Alex, Benoit, Clément D., Clouclou, Chloé, Constance, Damien, Elias et Clara, Eloïse, Fran, Franck, Gabin, Grégory, Hamza, Hippolyte, Hortense, Jacques, Jérémie, Juliette, Loïc et Ludo, Lulu et Pierrot, Manu et Mathilde, Maxime, Miryam, Patrice, Sébastien, Sofiane, Tim, Tristan, Ugo, Valentin, Victor et tous ceux que j'oublie pour toutes les joies et bonnes occasions de trinquer, passées et à venir ;) Merci infiniment à Laurane, d'avoir eu le courage de relire ce pavé et pour tout ton soutien depuis tant d'années <3

Merci à ma famille pour leur soutien indéfectible. Merci à Hélène, Julie et Antoine pour nos week-ends de jeux endiablés, et à Pascale et Jacques pour leurs encouragements répétés. Et merci spécial à ma maman pour avoir contribué au pot après la soutenance.

Et enfin, j'écris mes tous derniers mots de ce mémoire pour celui sans qui je n'aurais eu aucune chance de le faire... Antoine, merci infiniment, pour tout !

Résumé

Une carte multi-échelle est un ensemble de cartes à différentes échelles, dans lequel l'utilisateur peut naviguer via un géoportail. Chacune de ces cartes est préalablement construite par généralisation cartographique, processus qui adapte la représentation cartographique à une échelle donnée. Les changements de représentations qu'implique la généralisation entre deux cartes à différentes échelles sont susceptibles de perturber l'utilisateur, rendant sa navigation plus difficile. Nous proposons dans cette thèse d'ajouter des représentations intermédiaires dans une carte multi-échelle existante, pour créer une évolution plus fluide du contenu cartographique au fil des échelles.

Alors que de solides connaissances théoriques existent pour la conception cartographique traditionnelle, on ne sait pas encore comment concevoir une carte multi-échelle efficace. Pour formaliser des connaissances à ce sujet, nous avons étudié un panel de seize cartes multi-échelles existantes. Nous avons analysé les systèmes de zoom utilisés ainsi que l'évolution des représentations cartographiques au fil des échelles, en particulier les changements de niveaux d'abstraction pour les objets bâtis et routiers. Nous avons aussi évalué la variation de complexité visuelle du contenu cartographique au fil des échelles, en utilisant des mesures de clutter visuel. Nous avons ainsi identifié les tendances générales en termes de représentations multi-échelles (comme l'application du standard WMTS), certains facteurs que nous considérons comme ayant une influence négative sur la navigation de l'utilisateur (comme l'utilisation d'une même carte à différentes échelles), ainsi que des pratiques intéressantes visant à la faciliter (comme les représentations mixtes). A partir de ces constats, nous avons formulé des hypothèses sur l'influence des variables de construction des représentations intermédiaires sur la fluidité de navigation. Nous avons construit un matériel de test à partir d'un extrait de la carte multi-échelle Scan Express de l'IGN, entre les cartes existant au 1 : 25k et au 1 : 100k. Nous avons ainsi produit quatre versions différentes de représentations intermédiaires entre ces deux cartes, implémentant nos différentes hypothèses. Cet exercice nous a permis de mieux cerner les verrous techniques que soulève la production de représentations intermédiaires. Nous avons enfin conduit un test utilisateurs contrôlé, en demandant à 15 participants de réaliser une tâche cartographique sur ces différentes cartes multi-échelles, pour évaluer la pertinence de nos hypothèses.

Mots-clés : carte multi-échelle, représentation intermédiaire, fluidité de navigation, généralisation cartographique, niveau d'abstraction, test utilisateurs

Abstract

A multi-scale map is a set of maps at different scales, displayed on mapping applications, in which users may navigate by zooming in or out. Each of these maps is produced beforehand by cartographic generalization, which aims to adapt the cartographic representation for a target scale. Due to generalization, the representation changes between maps at different scales may disturb the user during its navigation. We assume that adding intermediate representations in an existing multi-scale map may enable a smooth evolution of cartographic content across scales.

While theoretical knowledge exists for traditional cartography, we still do not know how to design efficient multi-scale maps. To formalize knowledge on that subject, we studied sixteen existing multi-scale maps. We focused on the used zooming system (zoom levels and display scales) and on the evolution of cartographic representations across scales, in particular for building and road entities. We also analyzed the variation of visual complexity of the map content across scales, using visual clutter measures. We thus identified general trends in terms of multi-scale representation (i.e. use of WMTS standard), some potential disturbing factors (i.e. use of a same map at different scales), but also good practices which may ease the user navigation (i.e. mixed representations). Based on these findings, we made assumptions on the influence of intermediate representations design on user navigation. We built test material from an extract of the Scan Express multi-scale map of the French IGN, between the existing maps at 1:25k and 1:100k scales. We thus produced four different versions of intermediate representations between these two maps, implementing our different hypotheses. This way, we highlighted the technical issues that we faced when producing intermediate representations. Finally, we conducted a controlled user study, asking 15 participants to perform a cartographic task on these different multi-scale maps, to evaluate our hypotheses.

Keywords: multi-scale map, intermediate representation, smooth zooming, cartographic generalization, level of abstraction, user study

Table des matières

Remerciements 3

Résumé 4

Abstract 5

Table des matières 6

Table des illustrations 12

Glossaire 20

Introduction 24

I.1. Contexte : Démocratisation de la cartographie numérique 25

I.2. Environnement scientifique : le projet MapMuxing 27

I.3. Objet d'étude : la carte topographique multi-échelle 28

I.4. Problématique de la thèse : Améliorer la fluidité de navigation dans une carte topographique multi-échelle 30

Chapitre A. Conception, Visualisation et Évaluation de Cartes Topographiques Multi-Échelles 32

A.1. Conception et Généralisation de Cartes à Différentes Échelles 33

A.1.1. Représentation de l'Information Géographique 33

A.1.2. Échelle Cartographique, Niveau de Détail et Lisibilité 34

A.1.3. Processus de Généralisation Cartographique 37

A.1.4. Automatisation de la Généralisation Cartographique 39

A.1.5. Pratiques de la Généralisation Automatique en Production 40

A.2. Généralisation Cartographique Multi-Échelle 41

A.2.1. Enjeux de la Généralisation Multi-Échelle 42

A.2.2. Généralisation Multi-Niveaux vs Généralisation Continue 45

A.2.3. Généralisation Continue pour une Évolution plus Progressive 48

A.2.4. Généralisation MR-aware Pour une Évolution Plus Cohérente 49

A.2.5. Bases de Données Multi-Échelles et Liens entre Représentations 51

A.3. Visualisation de Cartes Multi-Échelles 53

A.3.1. Méthodes de Visualisation de Représentations Cartographiques Hétérogènes 53

A.3.2. Interfaces de Visualisation Standard des Cartes Multi-Échelles 56

A.3.3. Structure des Cartes Multi-Échelles 58

A.3.4. Interactions et Opérations de Zoom dans une Pyramide Multi-Échelle 58

A.4. Évaluation de Cartes Multi-Échelles 61

A.4.1. Évaluation du Processus de Généralisation Cartographique 61

A.4.2. Évaluation de l'Évolution du Contenu Au Fil des Échelles 64
A.4.3. Tests Utilisateurs 65
A.5. Reformulation des Objectifs et Contributions Attendues 67
A.5.1. Reformulation des Objectifs, Positionnement et Périmètre de Nos Travaux 67
A.5.2. Démarche Adoptée et Contributions Attendues 68
Chapitre B. Étude de Cartes Multi-Échelles Existantes 70
B.1. Objectifs, Panel et Méthodes d'Analyse 71
B.1.1. Exemples d'Études Comparatives en Cartographie 71
B.1.2. Panel de Cartes Topographiques Multi-Échelles Étudiées 72
B.1.3. Méthodes d'Analyse Utilisées 73
B.2. Facteurs Perturbateurs et Bonnes Pratiques 74
B.2.1. Hétérogénéité de Légende entre Échelles 74
B.2.2. Incohérences de Contenu entre Échelles 76
B.2.3. Adaptation du Contenu Cartographique à l'Échelle d'Affichage 77
B.2.4. Changements de Niveaux d'Abstraction 79
B.3. Zoom, Échelles d'Affichage et Échelles de Symbolisation 80
B.3.1. Systèmes de Zoom Utilisés 80
B.3.2. Échelles d'Affichage Utilisées 81
B.3.3. Relation entre Échelle d'Affichage et Échelle de Symbolisation 83
B.4. Évolution du Contenu Cartographique en Fonction de l'Échelle d'Affichage : Focus sur les Thèmes du Bâti et du Routier 86
B.4.1. Choix et Protocole d'Analyse 86
B.4.2. Critères d'Analyse du Bâti en Fonction de l'Échelle d'Affichage 86
B.4.3. Représentation du Bâti en Fonction de l'Échelle d'Affichage 89
B.4.4. Critères d'Analyse du Routier en Fonction de l'Échelle d'Affichage 92
B.4.5. Représentation du Routier en Fonction de l'Échelle d'Affichage 93
B.5. Variation de la Complexité Visuelle du Contenu Cartographique en Fonction de l'Échelle d'Affichage 96
B.5.1. Définition et Évaluation de la Complexité d'une Carte 96
B.5.2. Mesures de Clutter : Méthodes Existantes et Pertinence 97
B.5.3. Protocole d'Analyse et Mesures de Clutter Utilisées 98
B.5.4. Sensibilité et Cohérence des Différentes Mesures de Clutter Utilisées 100
B.5.5. Variations du Clutter en Fonction de l'Échelle d'Affichage 104
Chapitre C. Hypothèses d'Amélioration des Cartes Multi-Échelles 109
C.1. Hypothèses d'Amélioration des Cartes Multi-Échelles Existantes 110

C.1.1. Définition du Concept de Représentation Intermédiaire 110
C.1.2. Nombre de Représentations Intermédiaires 111
C.1.3. Répartition des Intervalles d'Affichage des Représentations Intermédiaires 114
C.1.4. Transition de Représentation Créée par les Représentations Intermédiaires 116
C.2. Protocole d'Évaluation de nos Hypothèses....118
Chapitre D. Production de Représentations Intermédiaires....121
D.1. Cas d'application et Pyramide Initiale....122
D.1.1. Cas d'application : la Pyramide Scan Express 122
D.1.2. Préparation et Limites du Matériel Initial....123
D.2. Choix de Construction des Représentations Intermédiaires....127
D.2.1. Nombre de Représentations Intermédiaires....128
D.2.2. Répartition des Intervalles d'Affichage des Représentations Intermédiaires 129
D.2.3. Symbolisation des Représentations Intermédiaires 130
D.2.4. Généralisation des Représentations Intermédiaires 132
D.3. Représentations Intermédiaires pour les Thèmes Invariants 135
D.3.1. Hydrographie 135
D.3.2. Occupation du Sol et Végétation....138
D.3.3. Structures publiques non bâties (cimetières, terrains de sport) 139
D.3.4. Limites administratives 140
D.3.5. Réseau de Voies Ferrées....140
D.3.6. Réseau routier 140
D.4. Production de Transitions Alternatives pour le Thème du Bâti 147
D.4.1. Différentes Pyramides Produites et Intérêt pour Nos Hypothèses....147
D.4.2. Transition Construite par Typification 150
D.4.3. Transition Construite par les Processus AGENT/CartACom....157
D.4.4. Transition Construite par Agrégation Progressive 160
D.4.5. Variante avec Préservation des Repères Visuels 164
D.5. Création et Visualisation des Pyramides 168
D.5.1. Processus de Rastérisation et de Tuilage Automatique 169
D.5.2. Choix du Système de Visualisation Multi-Échelle....171
D.5.3. Configuration du Format des Pyramides Produites 171
Chapitre E. Test utilisateurs 177
E.1. Objectifs du Test et Analyse des Travaux Existants 178
E.1.1. Rappel des Objectifs de notre Test Utilisateurs 178

E.1.2. Intérêt Potentiel des Méthodes d'Évaluation Existantes 179
E.1.3. Intérêt Potentiel des Protocoles de Test Existants.....180
E.2. Tâche Cartographique Multi-Échelle 182
E.2.1. Intérêt Potentiel des Tâches Existantes 182
E.2.2. Tâche Cartographique Multi-Échelle.....187
E.2.3. Évaluation de la Réussite de la Tâche 191
E.3. Protocole de notre Test Utilisateurs.....192
E.3.1. Variables et Facteurs Impliqués.....192
E.3.2. Plan d'Expérience, Nombre de Participants et Contre-Balancement 193
E.3.3. Profil et Panel de Participants 195
E.3.4. Déroulement Type d'une Session du Test Utilisateurs.....197
E.4. Implémentation de notre Test Utilisateurs.....198
E.4.1. Processus de Sélection des Marqueurs et des Itinéraires.....198
E.4.2. Interface Graphique et Implémentation de la Tâche 201
E.4.3. Mesures et Enregistrements des Performances Utilisateur.....204
E.5. Analyse des Résultats de notre Test Utilisateurs 205
E.5.1. Influence de la Carte Multi-Échelle sur la Réussite de la Tâche 205
E.5.2. Influence des Autres Variables sur la Réussite de la Tâche 208
E.5.3. Analyse Qualitative des Métriques de Navigation et d'Affichage.....213
E.5.4. Analyse du Questionnaire Qualitatif.....216
E.5.5. Discussion sur les Résultats et la Pertinence de notre Test Utilisateurs.....218
Conclusion et Perspectives 222
Annexes.....232
Annexe A. Relevé des Echelles d'Affichage Utilisées 233
1. Échelle d'Affichage Indiquée ou Mesurée.....233
2. Protocole de Mesure de l'Échelle d'Affichage.....234
3. Résultats de la Mesure Manuelle de la Barre d'Échelle (en cm).....234
4. Cohérence des Échelles d'Affichage 236
Annexe B. Échelles d'Affichages Utilisées dans les Cartes Multi-Échelles Étudiées 237
Annexe C. Évolution de la Représentation du Bâti en Fonction de l'Échelle d'Affichage 239
1. Évolution de la Représentation du Bâti entre les Échelles d'Affichage 0 et 1 : 10k.....240
2. Évolution de la Représentation du Bâti entre les Échelles d'Affichage 1 : 10k et 1 : 100k...241
3. Évolution de la Représentation du Bâti entre les Échelles d'Affichage 1 : 100k et 1 : 1M ...242
Annexe D. Évolution de la Représentation du Routier en Fonction de l'Échelle d'Affichage.....243

1. Évolution de la Représentation des Carrefours Complexes entre les Échelles d'Affichage 0 et 1 : 10k 244
2. Évolution de la Représentation des Carrefours Complexes entre les Échelles d'Affichage 1 : 10k et 1 : 100k 245
3. Évolution de la Représentation des Carrefours Complexes entre les Échelles d'Affichage 1 : 100k et 1 : 1M 246
4. Évolution de la Représentation du Réseau Routier entre les Échelles d'Affichage 0 et 1 : 10k 247
5. Évolution de la Représentation du Réseau Routier entre les Échelles d'Affichage 1 : 10k et 1 : 100k 248
6. Évolution de la Représentation du Réseau Routier entre les Échelles d'Affichage 1 : 100k et 1 : 1M 249

Annexe E. Échantillons des pyramides étudiées 250
1. ACT Luxembourg 251
2. BEV Autriche 253
3. Bing Maps 255
4. GDI Allemagne 259
5. Google Maps 262
6. ICGC Catalogne 266
7. IGN Espagne 269
8. IGN Scan Express 272
9. IGN Scan 275
10. Lantmäteriet Suède 279
11. NGI Belgique 283
12. NLS Finlande 285
13. OpenStreetMap 288
14. OS Irlande 291
15. Swisstopo Suisse 294
16. USGS États-Unis 297

Annexe F. Mesures de Clutter 301

Annexe G. Extrait des pyramides produites 307
1. Pyramide initiale construite à partir des cartes existantes ScanExpress 307
2. Pyramide construite par un processus de typification 308
3. Pyramide construite par les processus AGENT/CartACom 309
4. Pyramide construite par agrégation progressive 310
5. Pyramide construite par agrégation progressive avec repères visuels 311

Annexe H. Analyse des Tâches Cartographiques et Multi-Échelles Existantes 312

Annexe I. Formulaire de Consentement 314

Annexe J. Questionnaire d'Auto-Évaluation des Aptitudes Spatiales (SBSOD).....315

Annexe K. Introduction et Démonstration du Test.....317

Annexe L. Évaluation Subjective.....319

Annexe M. Légende des Cartes Multi-Échelles.....320

Références 321

Publications Personnelles 339

Table des illustrations

Figure 1. Extrait de la carte multi-échelle Scan Express, produite par l'IGN [Lafay et al., 2015]. 27
Figure 2. Comparaison entre fonds de carte topographiques (Google Maps à gauche, OpenStreetMap au milieu) et carte topographique (Scan 100® de l'IGN à droite). 28
Figure 3. Exemple d'adaptation de la carte topographique de l'IGN (Scan 25® à gauche) à une vocation de fond de carte (Scan Express 25 à droite). 28
Figure 4. Différents modes de représentation d'une scène (à gauche) : vecteur (au milieu) ou raster (à droite). 32
Figure 5. Un phénomène géographique a une gamme d'échelles de validité, au-delà de laquelle sa représentation ne sera plus significative. 33
Figure 6. Exemples de seuils de lisibilité dans une carte imprimée, extrait de [Weger 1999, p25]. 35
Figure 7. Comparaison entre une version généralisée et une simple réduction "photo" d'une carte plus détaillée. 36
Figure 8. Illustration des termes utilisés pour désigner les différents types de généralisation. 37
Figure 9. Exemples d'opérateurs de généralisation susceptibles d'être utilisés dans cette thèse, illustrés et définis par [Mustière 2001]. 37
Figure 10. Les cartes multi-échelles existantes peuvent présenter d'importants changements de représentation entre deux niveaux de zoom consécutifs. *Extraits : ICGC Catalogne*. 42
Figure 11. Illustration des 5 gammes de niveaux de détail définis pour le format standard CityGML [OGC 2012]. *Source de l'image : TUDelft.* 43
Figure 12. Illustration du ScaleMaster [Brewer et Buttenfield, 2007; Touya et Girres, 2013]. 44
Figure 13. Illustration de la structure *Smooth Space Scale-Cube* (b), qui contrairement à une carte multi-échelle ici modélisée en (a), ne stocke que les transformations subies par les objets. *Source de l'image : [*van Oosterom et al., 2014*].* 46
Figure 14. Illustration de la méthode proposée par [Cecconi et Galanda, 2002]. 46
Figure 15. Utilisation des cartes stationnaires et transitoires selon [van Kreveld 2001], exemple en violet : l'opération de zoom s'arrête sur une carte transitoire (dans une zone rouge), une transformation est donc appliquée pour aller jusqu'à la carte stationnaire (en bleu) la plus proche en termes de généralisation, tout en restant à une échelle d'affichage constante. 48
Figure 16. Illustration d'une incohérence potentielle dans une carte multi-échelle, ainsi que du concept de généralisation MR-aware [Girres et Touya, 2014] : pour généraliser les données à une échelle intermédiaire, on prend en compte la représentation moins détaillée existante. 49
Figure 17. Illustration de la méthode de sélection de points introduite par [Schwartges et al., 2013] : les cônes représentent l'emprise des points sur la plage d'échelles considérée, une intersection signifiant un conflit spatial (à gauche), qui sera résolu en tronquant l'un des deux cônes (à droite). 50
Figure 18. Stratégie en étoile (à gauche) et en échelle (à droite) pour la dérivation de BDC à différentes échelles à partir d'une BDG détaillée. 51
Figure 19. Pour passer d'un histogramme empilé à un histogramme classique et éviter des représentations non valides (transition en haut de l'image), [Heer et Robertson, 2007] proposent de décomposer la transition en deux étapes (en bas de l'image) : décalage des barres en abscisses puis descente verticale. *Source de l'image* : [Heer et Robertson, 2007]. 53
Figure 20. Continuum entre une représentation abstraite (carte à l'extrémité gauche en haut) et une représentation réaliste (image aérienne à l'extrémité gauche en bas) proposé par [Hoarau 2015]. 54
Figure 21. Exemple de visualisation simultanée d'une carte (à gauche) et d'une image aérienne (à droite). Pour les représenter ensemble (au milieu), nous avons augmenté la transparence de la carte topographique. 54
Figure 22. La loupe Sigma Lens (à gauche) comme outil de visualisation de deux représentations hétérogènes [Pietriga et al., 2008], comme une carte et une image aérienne ; ou bien comme outil de suivi d'un

itinéraire ici illustrée par Route Lens (à droite) [Alvina et al., 2014]. 55
Figure 23. Illustration du fonctionnement d'une architecture client-serveur cartographique. 56
Figure 24. A gauche, contenu affiché à l'écran pour cinq niveaux de zoom de la carte multi-échelle Scan Express, produite par l'IGN. A droite, explication de sa structure pyramidale. 57
Figure 25. Différents types d'outils de zoom existants. Captures respectivement issues des géoportails de Swisstopo, de l'ICGC Catalogne, de l'OS Irlande, de l'IGN (ancienne version) et de l'ICGC Catalogne également. 58
Figure 26. Comparaison entre un système de zoom discret et un système de zoom continu, dans lequel l'utilisateur peut s'arrêter à n'importe quelle échelle, le système réalisant un agrandissement « photo » de la représentation précédente, jusqu'à atteindre la prochaine représentation disponible. 59
Figure 27. Illustration des fonctions d'évolution des valeurs de seuil proposées par [Bard 2004]. 62
Figure 28. A une même échelle, on peut utiliser un degré de généralisation différent (A, B, C), représentant la "force de simplification" du processus de généralisation. 64
Figure 29. La pyramide Scan IGN à gauche, produite à partir de cartes topographiques avec des légendes très différentes et la pyramide Scan Express à droite, produite avec des légendes plus homogènes [Lafay et al., 2015]. 74
Figure 30. Deux niveaux de zoom consécutifs de la pyramide Scan Express : l'autoroute, particulièrement saillante en bleu à gauche, change de couleur et devient rouge à droite. 74
Figure 31. Ces deux niveaux de zoom consécutifs de la pyramide Scan IGN présentent (outre une différence de symbolisation) une représentation incohérente pour le bâtiment entouré. 75
Figure 32. Incohérence de contenu entre trois niveaux consécutifs de la pyramide Google Maps : le nom de la rue entouré disparait puis réapparait à l'échelle suivante. 75
Figure 33. Le toponyme « Cathédrale Notre-Dame de Paris » prend une position variable par rapport à son point de référence, entre les différents niveaux de zoom de la pyramide Google Maps. 76
Figure 34. Six niveaux de zoom (LoZ) consécutifs de la pyramide Scan IGN, utilisant deux à deux un même contenu cartographique (niveaux 15-14, 13-12 et 11-10). 77
Figure 35. Complexité du contenu cartographique variable à même échelle entre différents producteurs cartographiques. Extraits : Google Maps, OpenStreetMap, Swisstopo. 78
Figure 36. Trois niveaux de zoom consécutifs de la pyramide Scan Express de l'IGN, présentant une abstraction différente du contenu cartographique. 78
Figure 37. Comparaison entre les différents systèmes de zoom existants : discret, continu et animé. Les tirets représentent les échelles où il est possible d'arrêter une opération de zoom (non exhaustif pour le zoom continu). Les tirets verts en particulier représentent les niveaux de zoom où la représentation cartographique change. 79
Figure 38. Distribution des échelles d'affichage utilisées dans les pyramides étudiées. 81
Figure 39. Dispersion des échelles d'affichage en fonction du niveau de zoom standard WMTS. 82
Figure 40. Relation entre échelles d'affichage (en abscisse) et échelles de symbolisation (en ordonnée) pour chaque niveau de zoom de chaque pyramide étudiée. Les encadrés verts montrent qu'il n'y a pas de consensus entre les producteurs sur cette relation. Cependant, les lignes rouges et bleues encadrant la majorité des points représentés indiquent une tendance dans cette relation. Les valeurs qui ne suivent pas cette tendance (ellipses rouge et bleue) présentent d'ailleurs un contenu non adapté à l'échelle d'affichage. 83
Figure 41. Extraits des niveaux de zoom correspondants aux valeurs extrêmes, pour IGN Espagne (extrême gauche, ellipse rouge sur la Figure 40) et Scan Express (extrême droite, ellipse bleue). 84
Figure 42. Typologie des niveaux d'abstraction définis pour le thème du bâti, respectivement de gauche à droite : bâtiment individuel, ilot urbain, aire urbaine et ville ponctuelle. Extraits : ICGC Catalogne. 86
Figure 43. Représentations mixtes distinguées dans cette étude : une représentation conjointe des bâtiments individuels et des ilots urbains, en fonction de la densité locale à gauche (Extrait : ICGC Catalogne) et une représentation simultanée des bâtiments individuels et de l'aire urbaine à droite (Extrait : Lantmäteriet Suède). 86

Figure 44. Typologie des processus de généralisation utilisée pour le thème du bâti. Extraits : Swisstopo 87
Figure 45. Légende du graphe présentant les résultats d'analyse pour le bâti. 88
Figure 46. Extrait du graphe représentant les résultats d'analyse de l'évolution de la représentation du bâti en fonction de l'échelle d'affichage dans les cartes multi-échelles étudiées. 88
Figure 47. Pourcentage d'utilisation des différents niveaux d'abstraction du bâti en fonction de l'échelle d'affichage, dans les 16 pyramides étudiées. 89
Figure 48. Exemple de transition par agrégation des bâtiments individuels en ilots urbains dans le niveau intermédiaire. Extraits : ICGC Catalogne. 90
Figure 49. Exemple de transition par superposition : le niveau intermédiaire représente le bâti individuel superposé à l'aire urbaine. Extraits : NLS Finlande. 90
Figure 50. Conservation des structures spatiales par utilisation d'un algorithme de typification du bâti, dans quatre niveaux de zoom consécutifs. Extraits : Swisstopo. 90
Figure 51. Exemple de conservation des bâtiments publics (symbolisés en rouge et violet) au-dessus des ilots urbains, entre le 1 : 25k à gauche et le 1 : 50k à droite. Extraits : Scan Express France. 90
Figure 52. Typologie des niveaux d'abstraction relevés pour les structures complexes telles que les ronds-points ou les bretelles d'accès. Extraits : Scan IGN. 91
Figure 53. Typologie des processus de généralisation relevés pour le thème du routier. 92
Figure 54. Pourcentage d'utilisation des différents niveaux d'abstraction du réseau routier en fonction de l'échelle d'affichage, dans les 16 pyramides étudiées. 93
Figure 55. Pourcentage d'utilisation des différents niveaux d'abstraction des carrefours complexes en fonction de l'échelle d'affichage, dans les 16 pyramides étudiées. 93
Figure 56. Évolution de la symbolisation des routes locales dans les pyramides non institutionnelles : les routes paraissent grises lorsque leur liseré blanc n'est plus distinguable, ce qui facilite la lecture de la carte. 94
Figure 57. Évolution des valeurs de clutter pour les trois mesures utilisées, en fonction du niveau de zoom correspondant (LoZ), pour la pyramide Scan Express de l'IGN. 98
Figure 58. Représentation des résultats graphiques des mesures de clutter dans l'image de gauche extraite de la pyramide Scan IGN, respectivement avec les mesures dite par quadtree (au milieu) et basée segmentation (à droite). 98
Figure 59. Comparaison de la forme des courbes obtenues pour les trois mesures de clutter de notre étude, pour une même pyramide, ici Scan Express de l'IGN, les différences de sens de variations sont mises en évidence en jaune. Les différentes mesures n'ayant pas la même gamme de valeurs, l'axe des ordonnées n'est ici pas significatif. Suite à l'utilisation de deux niveaux de zoom dans la plupart des géoportails étudiées, des points sont associés au niveau de zoom 8,5. 100
Figure 60. Évolution de la mesure de clutter par *subband entropy* pour la pyramide Scan Express de l'IGN, pour cinq niveaux de zoom consécutifs (LoZ 12 à 8). L'axe des niveaux de zoom est ici inversé par rapport aux autres graphiques de cette partie, mais nous semble ici plus intuitif pour appréhender la variation de complexité qu'implique la répétition de contenu cartographique. 101
Figure 61. Évolution du clutter en fonction du niveau de zoom (LoZ), mesurée par la méthode basée segmentation pour trois versions de la pyramide Scan Express utilisant chacune une palette différente : classique, standard ou en niveaux de gris [Lafay et al., 2015]. 102
Figure 62. Représentation graphique du résultat de la méthode par *quadtree* (à droite) pour un échantillon de la pyramide Scan IGN (à gauche). 102
Figure 63. Illustration des variations locales des mesures de clutter en gris, c'est-à-dire des écarts de clutter entre deux niveaux de zoom consécutifs (LoZ), pour une pyramide donnée. 103
Figure 64. Trois niveaux de zoom consécutifs pour les pyramides Scan Express (en haut), où chaque niveau montre un contenu différent, et Scan IGN (en bas) où le contenu des niveaux 12 et 13 est le même. 104
Figure 65. Évolution du clutter mesuré par la méthode de subband entropy pour les cartes présentées dans la Figure 64. 105
Figure 66. Courbe moyenne des mesures de clutter dans les 16 pyramides étudiées, pour chacune des trois mesures de clutter utilisées. 105

Figure 67. Distinction entre niveau de zoom intermédiaire et représentation intermédiaire. 109
Figure 68. Évolution théorique attendue de la fluidité de navigation en fonction du nombre de représentations intermédiaires ajoutées, selon notre hypothèse. Précisons que cette figure n'a vocation qu'à illustrer notre hypothèse ici et n'a aucune valeur mathématique. 112
Figure 69. Différentes répartitions des intervalles d'échelles d'affichage de trois représentations intermédiaires, tout en respectant leur intervalle de validité. 114
Figure 70. Différence de répartition entre des intervalles d'échelles respectant le standard WMTS (en haut), des échelles critiques (au milieu, simplement illustratives ici) et des intervalles d'échelles d'amplitude constante (en bas). 115
Figure 71. Extrait de la pyramide Scan Express, des cartes existantes définies au 1 : 25k et au 1 : 100k..... 122
Figure 72. Extrait de la carte définie au 1 : 50k dans la pyramide Scan Express, le bâti étant représenté sous forme d'aires urbaines (en beige). 123
Figure 73. Situation géographique de notre zone d'étude, dans le sud-ouest de la France (en rouge à droite), sur une emprise de 30 km par 15 km autour de Saint-Jean-De-Luz (à gauche). La carte Scan Express définie au 1 : 250k sert ici à des fins d'illustration et n'est pas utilisée par ailleurs. 124
Figure 74. Comparaison entre les représentations existantes (à gauche) et le matériel de test (à droite), après sélection des thèmes géographiques, pour la carte au 1 : 25k (en haut) et au 1 : 100k (en bas). 125
Figure 75. Hétérogénéités de légende entre les représentations des routes dans les cartes existantes : l'autoroute, particulièrement saillante en bleu sur la carte au 1 : 100k, ne l'est plus en rouge au 1 : 25k ; les routes secondaires en jaunes au 1 : 25k sont représentées en blanc au 1 : 100k. 126
Figure 76. Proposition de démarche dichotomique pour produire un nombre impair de représentations intermédiaires : on produit d'abord la représentation niv2, comme « à mi-chemin » des cartes existantes en termes de simplification du contenu cartographique, avant de produire respectivement les niv1 et niv3, elles aussi comme intermédiaire entre le niv2 et la carte existante correspondante. 127
Figure 77. Exemple de fichier SLD permettant de définir une règle de symbolisation pour une couche de données géographiques *Bâtiments*. Ici les objets dont l'attribut *nature* prend la valeur *Bâtiment commercial* seront représentés par un polygone de couleur grise (*#bfbfbf*) prenant la forme de leur géométrie. 129
Figure 78. Illustration de la nécessité d'utiliser les géométries symbolisées dans le processus de généralisation cartographique, plutôt que les géométries initiales. Précisons que les seuils de lisibilité utilisés servent seulement à l'illustration sans être forcément justifiés à cette échelle. 130
Figure 79. Découpage (en violet) de notre zone d'étude en trois parties pour pallier aux limites des capacités des algorithmes de généralisation du routier et du bâti. 132
Figure 80. Variation de la surface totale des surfaces d'eau (hors zones marines) en fonction de la représentation cartographique. 135
Figure 81. Structure utilisée pour sélectionner les *feuilles* du réseau hydrographique. 135
Figure 82. Variation de la longueur totale du réseau hydrographique en fonction de la représentation cartographique. 136
Figure 83. Résultats de notre processus de généralisation pour le réseau hydrographique. 136
Figure 84. Légende des données cartographiques représentant la nature du sol et la végétation sur notre zone d'étude, utilisée à toutes les échelles de notre pyramide. 137
Figure 85. Variation de symbolisation pour le sable humide à différentes échelles : la taille du motif augmente et la densité diminue en même temps que l'échelle, pour créer une transition progressive. 137
Figure 86. La représentation des cimetières et terrains de sport est facilement reconnaissable et relativement saillante dans la carte existante au 1 : 25k. 138
Figure 87. Variation de la symbolisation des cimetières à différentes échelles : la taille des motifs augmente donc la densité diminue avec au fil des échelles pour assurer leur lisibilité. Les cimetières ne sont pas représentés dans la carte existante au 1 : 100k. 138
Figure 88. Variation de la symbolisation des limites administratives de communes, vues à même échelle ici. 139
Figure 89. Variation de la symbolisation du réseau de voies ferrée, vues à même échelle ici. 139

Figure 90. Illustration de jonctions complexes du réseau routier en mauve, comme une patte d'oie à gauche, ou un rond-point à droite. 141
Figure 91. Illustration de l'algorithme de sélection utilisé pour le réseau routier en zone rurale. 142
Figure 92. Illustration du principe de l'algorithme de généralisation du routier en espace urbain par agrégation d'ilots [Ruas 1999 ; Touya 2010]. Ici le plus petit ilot (hors structures complexes déjà traitées) est identifié en rouge. Parmi ses voisins potentiels (en noir), le meilleur choix minimise la fonction de coût d'agrégation. 143
Figure 93. Illustration d'un groupe d'impasses présentant des cycles et devant encore être traité manuellement (en rouge). 144
Figure 94. Variation de la longueur totale du réseau routier au fil des représentations. 144
Figure 95. Résultats de notre processus de généralisation du routier en zone urbaine. 145
Figure 96. Résultats de notre processus de généralisation du routier en zone rurale. 145
Figure 97. Comparaison visuelle des stratégies d'évolution du bâti entre la pyramide initiale (en haut) et la pyramide produite par agrégation progressive (en bas). 147
Figure 98. Comparaison entre la pyramide produite par typification et la pyramide obtenue par agrégation progressive, les deux utilisant un même processus de généralisation, mais avec une force d'agrégation différente. 148
Figure 99. Comparaison entre la pyramide construite par agrégation progressive, et sa variante préservant les bâtiments saillants au-dessus des ilots urbains. 148
Figure 100. Comparaison entre les pyramides obtenues par un processus de généralisation basé sur les modèles AGENT et CartACom et par un processus de typification. 149
Figure 101. Utilisation d'un processus de typification à plusieurs échelles consécutives dans la pyramide cartographique de Swisstopo. 149
Figure 102. Utilisation d'un processus de typification entre deux échelles consécutives dans la pyramide cartographique de l'ICGC Catalogne, en remplaçant les objets existants par des carrés noirs non discriminés. 150
Figure 103. Conservation d'une représentation fidèle pour des repères visuels par le processus de typification de l'ACT Luxembourg. 150
Figure 104. Explication du principe de notre triangulation contrainte en fonction du réseau routier. 151
Figure 105. Illustration du principe de substitution, de gauche à droite : le plus petit arc (en rouge) est traité et un substitut (en vert) remplace les deux objets qu'il reliait, et les arcs avec ses voisins sont modifiés (en vert). 152
Figure 106. Illustration des trois méthodes utilisées pour corriger les conflits spatiaux entre bâtiments et entre bâtiment et route. 153
Figure 107. Illustration des résultats du processus de résolution de conflits spatiaux sur un extrait des données initiales au 1 : 25k. 154
Figure 108. Résultats de notre processus de typification au fil des représentations, en espace rural. 154
Figure 109. Résultats de notre processus de typification au fil des représentations, en espace urbain. 155
Figure 110. Résultats de notre processus de typification avec grisage des ilots urbains. 155
Figure 111. Extrait de la pyramide construite par AGENT/CartACom pour nos cinq représentations, sur un espace rural. 157
Figure 112. Extrait de la pyramide construite par AGENT/CartACom pour nos cinq représentations, sur un espace urbain. 157
Figure 113. Comparaison de l'évolution du grisage des ilots au fil des représentations intermédiaires entre la pyramide obtenue par AGENT/CartACom et la pyramide construite par typification. 158
Figure 114. Détection des ilots du centre-ville en marron foncé dans les communes portuaires de Saint-Jean-de-Luz et Ciboure, par notre méthode de sélection multicritères. 160
Figure 115. Résultats de la classification des ilots urbains à partir de la classification automatique des objets bâtis. Ici, ce sont les géométries agrégées des bâtis qui sont représentées et non pas les ilots. 161
Figure 116. Résultats de notre processus de sélection manuelle, à partir des résultats automatiques, des ilots

urbains à griser au fil des échelles. 162
Figure 117. Symbolisation des ilots urbains dans la légende Scan Express standard. 163
Figure 118. Exemple d'utilisation d'un processus d'agrégation en ilots urbains dans la pyramide de l'ICGC Catalogne, où le reste des bâtiments sont typifiés. 163
Figure 119. Préservation d'une représentation détaillée des bâtiments spéciaux (en rouge, violet, gris) au-dessus des ilots urbains dans la carte au 1 : 50k de la pyramide Scan Express. Si la géométrie de ces bâtiments est grossie, elle n'est pas simplifiée et présente parfois des problèmes de lisibilité à petite échelle. 164
Figure 120. Objets détectés comme repères visuels (en noir à droite) sur deux extraits de notre zone d'étude (respectivement en haut et en bas), pour un coefficient de 0,97. 165
Figure 121. Comparaison entre les points de repère potentiels détectés par la méthode automatique (à gauche) et ceux sélectionnés manuellement par un cartographe (à droite). 167
Figure 122. Illustration du calcul du nombre de tuiles nécessaires pour chaque représentation. Ici, pour garder des tuiles carrées et régulières comme le recommande le standard, le quadrillage couvre une zone plus grande que notre zone d'étude. 169
Figure 123. Arborescence de dossiers attendue par ZVTM pour les pyramides raster tuilées. 171
Figure 124. Illustration de la nécessité d'agrandir la taille des tuiles dans l'espace virtuel ZVTM en fonction du niveau de la pyramide, pour occuper une même emprise à l'écran. 172
Figure 125. Illustration de la méthode de calcul des coordonnées du centroïde de la tuile en noir : on multiplie les indices de colonne-ligne à la taille des tuiles au niveau 2 (512 UEV) puis on ajoute la moitié de la taille d'une tuile (256 UEV). 173
Figure 126. Méthode de calcul de la taille t' d'un élément graphique à une altitude a, en fonction de sa taille t dans l'espace virtuel et de la focale de la caméra (100 par défaut). 173
Figure 127. Extrait du fichier de configuration scene.xml pour une pyramide à cinq niveaux. 174
Figure 128. Représentations graphiques basées sur des variables visuelles élémentaires, utilisées en IHM dans les travaux de (a) [Plumlee et Ware, 2006] et (b) [Pietriga et al., 2007]. 179
Figure 129. Illustration extraite de [Jakobsen et Hornbaek, 2011] : la tâche *Navigate* consiste à zoomer sur la cible mise en évidence (première image) jusqu'à ce que le losange apparaisse (dernière image) pour la sélectionner en cliquant dessus. 182
Figure 130. Illustration extraite de [Wong et al., 2015] : cette tâche consiste à zoomer sur les cibles mises en évidence (marqueurs rouge sur l'image de gauche) jusqu'à ce qu'il soit possible de les sélectionner (quand elles passent en jaune). Une fois sélectionnées, elles sont représentées en vert quelle que soit l'échelle. 183
Figure 131. Illustration extraite de [Javed et al., 2012] : cette tâche consiste à identifier la cible identique à la référence (cible du milieu sur l'image de gauche), les cibles étant uniquement visibles à grande échelle (à droite) mais leur position étant indiquée sur la vue globale (à gauche). 184
Figure 132. Illustration extraite de [Lobo et al., 2015] : cette tâche consiste à identifier un ajout (A et D), une suppression (B et E) ou une modification (C et F) d'un bâtiment ou d'une route, entre une orthophoto et une carte topographique. 184
Figure 133. Les points de départ et d'arrivée de l'itinéraire sont représentés par des points respectivement vert et rouge, visibles tout au long de l'essai, quelle que soit l'échelle. NB : la complexité (longueur, sinuosité) de cet exemple d'itinéraire n'est pas représentative des itinéraires utilisés dans le test. 186
Figure 134. Le bouton *Itinéraire* change de couleur en-deçà d'une certaine échelle (à droite) pour indiquer que l'itinéraire-source est disponible. Pour l'afficher, l'utilisateur doit passer le pointeur sur ce bouton, situé à l'extérieur de la fenêtre de navigation. Par ailleurs, le niveau de transparence de l'itinéraire permet à la fois de distinguer le réseau routier sous-jacent et la forme des tronçons éliminés par la généralisation, comme le virage ici entouré en bleu. 187
Figure 135. Symbolisation et densité des marqueurs choisis pour notre test utilisateurs. Les points-cibles entourés correspondent à notre itinéraire exemple et montrent la répartition spatiale irrégulière des marqueurs. Ils sont ici mis en évidence uniquement pour les besoins de l'illustration. 188

Figure 136. Illustration des rétroactions permettant à l'utilisateur de juger la pertinence de son action : si le point est bien le suivant (à droite), il passe en vert de façon permanente et la partie de l'itinéraire correspondante apparait en violet ; si le point est bien sur l'itinéraire mais qu'il n'est pas le suivant immédiat (à gauche), il passe en vert de façon temporaire ; s'il n'est pas du tout sur l'itinéraire (en haut), il passe en rouge de façon temporaire. 188
Figure 137. Lorsque l'utilisateur clique sur le point d'arrivée (en rouge), l'itinéraire-cible change de représentation (à droite) pour signaler la complétion de la tâche et la fin de l'essai. 189
Figure 138. Différence d'ordonnancement de la variable pyramide, entre la méthode « par bloc » (à gauche) et un mélange sur l'ensemble des essais du test (à droite). 193
Figure 139. Conditions testées pour chaque essai (ligne) par chacun de nos 15 participants (colonne) : la pyramide utilisée est représentée par la couleur, selon la légende de la Figure 138, le numéro indique quant à lui l'itinéraire utilisé (de 0 à 4 pour l'entrainement et de 5 à 19 pour le test mesuré). 194
Figure 140. Processus de sélection semi-automatique des marqueurs à partir du réseau routier détaillé de la carte existante au 1 : 25k, à l'aide des outils Qgis mentionnés. Une correction manuelle est réalisée a posteriori, pour supprimer les ambigüités comme les points trop proches (entouré à gauche) ou sur l'axe d'un rond-point (entouré à droite), potentiellement ambigu si l'utilisateur ne pense pas à prendre le rond-point dans le sens giratoire. 198
Figure 141. Densité et répartition des marqueurs sur notre zone d'étude, ici représentés par des points rouges sur le réseau routier détaillé non symbolisé, pour les besoins de l'illustration. 198
Figure 142. Différence de complexité entre deux itinéraires, qui peut ici s'expliquer par les différences de contexte géographique, le nombre de changements de directions et la sinuosité de leur tracé. 199
Figure 143. Complexité, répartition spatiale et géométrie des itinéraires sur notre zone d'étude, ici représentés par des tronçons colorés sur le réseau routier détaillé non symbolisé, pour les besoins de l'illustration. Les itinéraires rouges sont les itinéraires de la phase d'entrainement et ont une complexité relativement variable. 200
Figure 144.Interface graphique de notre test utilisateurs, au cours du premier essai (Itinéraire 1). A cet instant, l'utilisateur a trouvé 20 des 22 points-cibles de l'itinéraire et a cliqué sur 2 distracteurs par erreur. A cette échelle, le bouton *Itinéraire* n'est pas disponible et l'essai n'étant pas terminé, le bouton *Suivant* ne l'est pas non plus. 201
Figure 145. Différence de symbolisation entre les états inactifs à gauche et activés à droite, pour les boutons *Suivant* et *Itinéraire* de l'interface graphique. 201
Figure 146. Fonction de passage des coordonnées cartésiennes en Lambert 93 aux coordonnées dans l'espace virtuel ZVTM, appliquant une translation puis une homothétie. 202
Figure 147. Répartition des pourcentages d'erreurs observés par rapport à la pyramide utilisée. La moyenne de l'ensemble des essais du test est représentée en rouge. 205
Figure 148. Répartition des temps de complétion observés par rapport à la pyramide utilisée. La moyenne de l'ensemble des essais du test est représentée en rouge. 206
Figure 149. Distribution des échantillons pour la variable *temps* à gauche, à laquelle nous appliquons une transformation logarithmique pour obtenir une distribution normale à droite. 207
Figure 150. Distribution non normale des échantillons pour la variable *erreurs*. La ligne bleue représente la moyenne de la distribution (7.23) et les lignes rouges représentent les limites de quartiles de la distribution, c'est-à-dire les intervalles des groupes de 25% d'effectifs. 209
Figure 151. Evolution des variables mesurées en fonction du numéro de l'essai, c'est-à-dire de l'avancement du test, respectivement dans le sens de la lecture pour les variables temps, erreur, quantité de zoom, quantité de pan, nombre et temps d'affichage de l'itinéraire-source. 212
Figure 152. Répartition des quantités d'opérations de déplacement (pan) à gauche et de zoom à droite, observées en fonction de la pyramide utilisée. La moyenne de l'ensemble des essais du test est représentée en rouge. 213
Figure 153. Répartition du nombre et du temps d'affichage de l'itinéraire-source, observés en fonction de la pyramide utilisée. La moyenne de l'ensemble des essais du test est représentée en rouge. 214

Figure 154. Illustration des itinéraires relativement complexe (en haut) 10 et 12, puis relativement simples (en bas) 5 et 15, les images étant prises à même échelle. 215
Figure 155. Répartition des réponses de nos participants au questionnaire qualitatif, basé sur une échelle de Likert à 7 niveaux de « *pas du tout d'accord* » à « *tout à fait d'accord* »..... 216
Figure 156. Echelle d'affichage indiquée numériquement sur le Géoportail de l'ACT-Luxembourg 232
Figure 157. La valeur de la barre d'échelle sera la distance équivalente indiquée, tandis que sa taille sera sa longueur mesurée en centimètres ou en pixels. 232
Figure 158. Au niveau de zoom minimal, la barre d'échelle a une taille variable, due aux déformations de la projection. 233
Figure 159.Échelles d'affichage calculées pour la première partie des pyramides étudiées. 236
Figure 160. Échelles d'affichage calculées pour la deuxième partie des pyramides étudiées 237
Figure 161. Extrait du graphe représentant les résultats d'analyse de l'évolution de la représentation du bâti en fonction de l'échelle d'affichage dans les cartes multi-échelles étudiées, sur la gamme d'échelles entre 0 et 1 : 10k. 239
Figure 162. Extrait du graphe représentant les résultats d'analyse de l'évolution de la représentation du bâti en fonction de l'échelle d'affichage dans les cartes multi-échelles étudiées, sur la gamme d'échelles entre 1 : 10k et 1 : 100k. 240
Figure 163. Extrait du graphe représentant les résultats d'analyse de l'évolution de la représentation du bâti en fonction de l'échelle d'affichage dans les cartes multi-échelles étudiées, sur la gamme d'échelles entre 1 : 100k et 1 : 1 000k. 241
Figure 164. Extrait du graphe représentant les résultats d'analyse de l'évolution de la représentation des carrefours complexes en fonction de l'échelle d'affichage dans les cartes multi-échelles étudiées, sur la gamme d'échelles entre 0 et 1 : 10k. 243
Figure 165. Extrait du graphe représentant les résultats d'analyse de l'évolution de la représentation des carrefours complexes en fonction de l'échelle d'affichage dans les cartes multi-échelles étudiées, sur la gamme d'échelles entre 1 : 10k et 1 : 100k..... 244
Figure 166. Extrait du graphe représentant les résultats d'analyse de l'évolution de la représentation des carrefours complexes en fonction de l'échelle d'affichage dans les cartes multi-échelles étudiées, sur la gamme d'échelles entre 1 : 100k et 1 : 1 000k..... 245
Figure 167. Extrait du graphe représentant les résultats d'analyse de l'évolution de la représentation du réseau routier en fonction de l'échelle d'affichage dans les cartes multi-échelles étudiées, sur la gamme d'échelles entre 0 et 1 : 10k. 246
Figure 168. Extrait du graphe représentant les résultats d'analyse de l'évolution de la représentation du réseau routier en fonction de l'échelle d'affichage dans les cartes multi-échelles étudiées, sur la gamme d'échelles entre 1 : 10k et 1 : 100k..... 247
Figure 169. Extrait du graphe représentant les résultats d'analyse de l'évolution de la représentation du réseau routier en fonction de l'échelle d'affichage dans les cartes multi-échelles étudiées, sur la gamme d'échelles entre 1 : 100k et 1 : 1 000k..... 248

Glossaire

Algorithme de généralisation Procédure programmatique définissant l'enchainement des transformations de généralisation à appliquer

Carte multi-échelle (ou **Pyramide**) Carte dynamique visualisable dans un géoportail, dans laquelle l'utilisateur peut naviguer en changeant d'emprise géographique à une même échelle (opération de déplacement ou pan) ou en changeant d'échelle (opération de zoom avant ou arrière)

Carte topographique Représentation détaillée des éléments naturels et artificiels situés sur la surface terrestre, ainsi que des formes du terrain [AFT 2000]

Charge cognitive Ensemble des efforts de mémorisation et d'analyse que l'utilisateur doit fournir pour comprendre ou utiliser son contenu [Sweller et al., 2011]

Cohérence Logique d'évolution facile à comprendre et à suivre pour l'utilisateur

Complexité visuelle (ou graphique) couvre la complexité de la distribution et de la symbolisation des objets de la carte

Complexité intellectuelle (ou cognitive) couvre la complexité de compréhension des structures spatiales et du message implicite de la carte

Complexité sémiologique couvre la complexité de compréhension du sens sémantique des symboles de la carte

Degré de généralisation Force du processus de généralisation utilisé pour produire la carte [Zhou 2014 ; Zhou et Jones, 2003]

Échelle d'affichage Rapport de réduction mathématique entre la taille d'un objet sur la carte à l'écran et sa taille sur le terrain

Échelle de symbolisation Échelle cartographique pour laquelle la carte a été produite, qui a donc déterminé la simplification du contenu cartographique et la taille des symboles utilisés

Échelle caractéristique Échelle cartographique la plus appropriée pour représenter un phénomène géographique en le rendant perceptible du lecteur [CFC 1970]

Échelle critique (ou **Point de généralisation**) échelle où un changement important de représentation est nécessaire, par exemple lorsque l'on doit changer de niveau de détail pour pallier aux limites des capacités d'analyse de l'être humain [Ratajski 1967]

Échelles limites Échelles cartographiques en deçà ou au-delà desquelles un phénomène géographique particulier perd sa signification [CFC 1970]

Échelle stationnaire Dans un système de visualisation multi-échelle sans zoom continu, mais où les transitions de représentation sont animées, échelle où l'utilisateur est susceptible d'arrêter son opération de zoom [van Kreveld 2001]

Échelle transitoire Dans un système de visualisation sans zoom continu, mais où les transitions de représentation sont animées, échelle qui contient les états intermédiaires permettant de créer une transition fluide entre les échelles stationnaires [van Kreveld 2001]

Efficacité d'une représentation ou d'un utilisateur pour une tâche donnée : Précision, rapidité et facilité, physique et cognitive, avec lesquelles la tâche est réalisée.

Évaluation subjective Questionnaire ou série d'affirmations jugeant un ressenti ou les caractéristiques d'un produit testé, avec lesquelles l'utilisateur doit exprimer son accord, souvent via une échelle de Likert

Fluide Assez facile à comprendre et à utiliser pour que l'utilisateur puisse réaliser une tâche donnée avec efficacité

Généralisation cartographique Processus de simplification de la représentation du contenu cartographique, pour garantir sa lisibilité à une échelle donnée, tout en conservant l'essentiel de son message

Généralisation continue Approche de généralisation multi-échelle qui consiste à définir un unique processus de généralisation pour toute la plage d'échelles considérée, dont le paramétrage varie en fonction de l'échelle

Généralisation MR-aware Approche de modélisation d'un processus de généralisation qui consiste à prendre en compte les représentations moins détaillées existantes pour produire de nouvelles échelles intermédiaires [Girres et Touya, 2014]

Généralisation multi-niveaux Approche de généralisation multi-échelle qui consiste à découper la plage d'échelles considérée en plusieurs intervalles adjacents, de taille variable, puis à définir le processus de généralisation à utiliser sur chacun d'entre eux

Géoportail Interface en ligne permettant la recherche, la visualisation et parfois même l'analyse de données géographiques de manière interactive [Tait 2005]

Intervalle de validité Intervalle d'échelles d'affichage sur laquelle une représentation intermédiaire est considérée comme valide

Légende Ensemble des symbolisations utilisées dans la carte

Navigation multi-échelle Action interactive qui consiste à parcourir une carte multi-échelle en effectuant des opérations de zoom avant ou arrière

Niveau d'abstraction Gamme de niveaux de détail définie par un même type d'implantation géométrique, ainsi qu'une richesse sémantique et une résolution géométrique similaires

Niveau de détail Quantité et précision d'information avec lesquelles une représentation cartographique modélise et décrit un phénomène géographique, définies par sa richesse sémantique, sa résolution géométrique, sa précision géométrique et sa granularité [Ruas 2004, p25]

Niveau de zoom intermédiaire Nouvelle échelle d'affichage à laquelle l'utilisateur peut stopper son opération de zoom dans une carte multi-échelle, ajoutée à celles déjà disponibles, sans nouvelle représentation cartographique

Opérateur de généralisation Type de transformations utilisé dans un processus de généralisation cartographique

Point de généralisation (ou **Échelle critique**) échelle où un changement important de représentation est nécessaire, par exemple lorsque l'on doit changer de niveau de détail pour pallier aux limites des capacités d'analyse de l'être humain [Ratajski 1967]

Progressif Qui se fait par degrés, de manière régulière et continue [Larousse 2017]

Pyramide (ou **Carte multi-échelle**) Carte dynamique visualisable dans un géoportail, dans laquelle l'utilisateur peut naviguer en changeant d'emprise géographique à une même échelle (opération de déplacement ou pan) ou en changeant d'échelle (opération de zoom avant ou arrière)

Représentation conjointe Représentation cartographique utilisant deux niveaux d'abstraction pour représenter le même phénomène géographique, le niveau d'abstraction de chaque entité étant choisi en fonction de son contexte géographique

Représentation fidèle Simplification de la représentation d'un repère visuel, conservant ses caractéristiques saillantes tout en s'autorisant à simplifier ses autres caractéristiques visuelles

pour assurer sa lisibilité

Représentation intermédiaire Nouvelle représentation cartographique que l'on ajoute dans une carte multi-échelle pour faciliter la navigation entre deux niveaux de zoom existants

Représentation mixte Représentation cartographique utilisant deux niveaux d'abstraction pour représenter le même phénomène géographique

Représentation simultanée Représentation cartographique utilisant deux niveaux d'abstraction pour représenter le même phénomène géographique, chaque entité étant représentée par les deux niveaux d'abstraction simultanément

Représentation valide Représentation lisible et efficace pour une échelle donnée, c'est-à-dire que la quantité d'information représentée et le niveau d'abstraction utilisé sont en adéquation avec les cas d'utilisation prévus à cette échelle

Stratégie de dérivation Logique selon laquelle les données à différentes échelles sont généralisées : avec une stratégie « en étoile » (*star* en anglais), les BDC à différentes échelles sont dérivées indépendamment par généralisation à partir d'une même BDG détaillée tandis qu'avec une stratégie « en échelle » (*ladder* en anglais), une première BDC est dérivée à partir d'une BDG détaillée, puis les BDC à plus petites échelles sont successivement dérivées à partir de la BDC précédente [Stoter 2005]

Système de zoom continu Système de navigation multi-échelle dans lequel l'utilisateur peut arrêter son opération de zoom à n'importe quelle échelle d'affichage : si aucune représentation cartographique n'est spécifiée à cette échelle, la carte affichée est alors obtenue par un agrandissement « photo » de la représentation connue précédente [van Kreveld 2001]

Tâche cartographique multi-échelle Tâche nécessitant l'analyse, la compréhension et l'utilisation de cartes à différentes échelles

Test utilisateurs Évaluation empirique impliquant la participation d'utilisateurs, permettant par exemple d'évaluer le potentiel d'un produit informatique ou de comprendre un phénomène physique, en mesurant et en comparant les actions réalisées par plusieurs participants dans différentes conditions

Transition de représentation Ensemble des changements de représentation, visuels ou sémantiques, qui interviennent entre deux échelles différentes d'une carte multi-échelle

Introduction

Pour introduire nos travaux, nous détaillerons dans un premier temps le contexte général de cette thèse : la démocratisation de la cartographie numérique (§I.1). Puis nous présenterons les enjeux qui motivent le projet collaboratif MapMuxing (§I.2), dans lequel s'inscrit cette thèse. Nous décrirons ensuite notre objet d'étude, la carte topographique multi-échelle (§I.3) et notre problématique, l'amélioration de la fluidité de navigation dans une telle carte (§I.4).

I.1. Contexte : Démocratisation de la cartographie numérique

Dans les années 1960, le développement de l'informatique donne naissance à la **cartographie numérique**. Les armées et agences nationales de cartographie sont les premières à accéder aux outils et compétences informatiques nécessaires, alors rares et coûteux. Acteur majeur de cet élan scientifique, la NASA développe alors de nouvelles technologies en imagerie satellite et GPS, permettant de cartographier le territoire plus rapidement et avec plus de précision [Batson 1987]. Puis les services techniques des grandes villes et les principaux opérateurs en eau, énergie et télécommunications investissent, créent leur infrastructure de données géographiques et numérisent leurs réseaux. Plus tard, lorsque la micro-informatique apparait, les données, outils et compétences informatiques sont décentralisés et enfin accessibles aux experts métier. Les domaines d'application utilisant des données géographiques se multiplient. On a désormais besoin de méthodes et d'outils informatiques pour faciliter l'acquisition, la gestion, le traitement et l'analyse de données géographiques issues de domaines thématiques variés : la **géomatique** se développe [Pornon 2007]. Les premiers logiciels de conception et de dessin assistés par ordinateur (CAO/DAO) apparaissent, puis le concept de **système d'information géographique** (SIG), permettant de « *rassembler, au sein d'un outil unique, des données diverses mais localisées dans le même espace géographique* » [Denègre et Salgé, 2004].

La cartographie fait ensuite son apparition sur Internet au début des années 2000. La carte, jusque-là simplement numérisée, devient interactive. En 2004, le géant du numérique Google lance **Google Maps** et permet enfin au grand public d'accéder facilement à une représentation cartographique mondiale à plusieurs échelles. Google a affirmé en 2014 que 41% des utilisateurs d'Internet utilisaient son service cartographique, avec plus d'un milliard de requêtes mensuelles [Parsons 2014]. A sa suite, d'autres producteurs cartographiques privés, spécialisés (Michelin par exemple) ou non (Microsoft, Apple), ainsi que bon nombre d'agences cartographiques nationales publient leurs données en ligne, via un portail de données cartographiques ou **géoportail** : « *a web site where the discovery of geographic content is a primary focus* » [Tait 2005]. Cette interface en ligne permet la recherche, la visualisation et parfois même l'analyse de données géographiques de manière interactive. Les géoportails proposent souvent d'afficher simultanément plusieurs couches de données, de naviguer interactivement pour changer d'emprise géographique ou d'échelle d'affichage, ou encore d'utiliser des outils cartographiques permettant de réaliser des mesures de distance ou des calculs d'itinéraire par exemple.

En plus de cette interface web, certains producteurs mettent également à disposition une **interface de programmation applicative** (API). Une telle bibliothèque de fonctions de programmation permet d'intégrer ces données et outils dans une application utilisateur tierce, par l'intermédiaire de quelques lignes de code seulement. A titre d'exemple, plus d'un million d'applications (web, logicielles ou mobiles) utilisaient en 2014 l'API Google Maps [Parsons 2014] et plus de 3700 sont basées sur l'API Géoportail de l'IGN en 2017 [IGN 2017]. Les données géographiques, jusqu'alors réservées aux experts, sont donc désormais accessibles au grand public : on parle de **néogéographie** [Turner 2006]. Pour assurer **l'interopérabilité** de ces données géographiques de types et de sources variés, des formats standards sont mis en place, notamment par *l'Open Geospatial Consortium* (OGC). Cet élan de standardisation a permis l'apparition des **mashups cartographiques**, applications composites permettant de créer rapidement et facilement une carte originale à partir de contenus existants provenant de sources variées [Crampton 2009].

Cette démocratisation de la cartographie numérique répond à la volonté des utilisateurs d'adapter leur représentation cartographique à leurs besoins. Certains producteurs institutionnels proposent désormais de créer des versions personnalisées de leurs cartes de référence, comme l'IGN avec son service *Carte à la Carte*[1], qui permet d'éditer une carte papier, en choisissant une carte topographique existante, une emprise personnalisée, avec la possibilité d'ajouter des annotations personnalisées (points d'intérêts, itinéraires). Les applications *Carto Builder*[2] ou *Mapbox Studio*[3] permettent aussi de construire une carte à partir d'un fond de carte au choix et d'un catalogue de jeux de données thématiques à ajouter en superposition. Le style de représentation graphique de chacune de ces couches thématiques peut ensuite être personnalisé.

Produire une carte n'est donc plus réservé aux cartographes, mais bien accessible à tous. Le domaine de recherche en **néocartographie** [Liu et Palen, 2010] étudie les problématiques que soulève la création de cartes par des non-experts, concernant notamment la facilité d'utilisation des outils de conception et la qualité des cartes produites. Des travaux de recherche proposent de conseiller l'utilisateur dans le choix de sa représentation [Harrie et al., 2002 ; Brewer 2003 ; Christophe 2009], d'évaluer et d'améliorer la carte a posteriori à l'aide d'indicateurs visuels [Bessadok 2015], ou bien de proposer des systèmes de conception automatique ou **carte à la demande** [Balley et Regnauld, 2011]. La difficulté de cette dernière proposition est double, car en plus de nécessiter un processus de production automatique, elle requiert de savoir traduire en spécifications cartographiques les caractéristiques du besoin utilisateur [Balley et al., 2014]. Par ailleurs, pour permettre cette adaptation à des besoins variés, des travaux de recherche proposent de **nouveaux modes de représentation cartographique**. On peut citer notamment le projet collaboratif *MapStyle*[4] (2012-2016), qui visait à améliorer les possibilités de symbolisation en s'inspirant de l'existant en informatique graphique, en art et en cartographie. Par exemple, des travaux ont été menés pour adapter à la représentation cartographique les caractéristiques visuelles du mouvement artistique du Pop art, de l'aquarelle ou de la peinture à la manière de Van Gogh [Christophe et al., 2016].

Allant encore plus loin dans la personnalisation, de nombreuses applications cartographiques proposent aujourd'hui aux utilisateurs de créer ou d'importer leurs propres données. Les smartphones, téléphones mobiles avec accès à Internet et équipés d'un récepteur GPS, permettent à un utilisateur non-expert de produire des données géographiques, en les capturant lui-même sur le terrain. **OpenStreetMap**[5] (OSM) est certainement l'exemple le plus abouti de ce nouveau mode de production d'information géographique. Ce projet international fondé en 2004 a pour vocation de créer une base de données géographique mondiale, libre et gratuite. Ces données sont saisies de manière collaborative, par des contributeurs qui peuvent être aussi bien issus du grand public ou du monde de la cartographie. Le domaine de recherche en **information géographique volontaire** (VGI en anglais) [Goodchild 2007] étudie les problématiques de qualité évidentes que soulèvent ces nouvelles pratiques. Cette évaluation est d'autant plus importante que les producteurs institutionnels souhaitent désormais utiliser ces contributions pour mettre à jour leurs données de référence [Bol et al., 2016].

[1] https://ignrando.fr/boutique/cac_accueil, consulté en mars 2018
[2] https://carto.com/builder, consulté en mars 2018
[3] https://www.mapbox.com/mapbox-studio/, consulté en mars 2018
[4] http://mapstyle.ign.fr, consulté en mars 2018
[5] http://www.openstreetmap.org, consulté en mars 2018

Grâce à l'avènement d'Internet, aujourd'hui utilisé par la moitié de la population mondiale[1], la cartographie numérique s'est démocratisée et est désormais accessible à tous, jusqu'au grand public. N'importe quel utilisateur peut accéder à une information géographique riche et précise, à travers un géoportail institutionnel, mais peut aussi produire ses propres cartes, à l'aide des applications de mashups cartographiques notamment. La quantité et la diversité des données géographiques disponibles ont explosé dans la dernière décennie, impliquant de nouveaux besoins en termes de représentation cartographique. L'enjeu majeur du domaine de la cartographie numérique est désormais de fournir des outils et méthodes pour concevoir, visualiser et évaluer ces nouvelles représentations cartographiques. C'est l'objectif du projet **ANR MapMuxing**[2], que nous introduisons dans le paragraphe suivant et dans lequel s'inscrit cette thèse.

I.2. Environnement scientifique : le projet MapMuxing

Le projet **ANR MapMuxing** (2014-2018) regroupe des chercheurs issus des domaines de recherche en cartographie (équipe COGIT de l'IGN)[3], en interfaces homme-machine ou **IHM** (équipe ILDA de l'INRIA)[4] et en gestion des risques environnementaux (UMR GRED)[5]. Cette thèse a été réalisée dans le cadre du projet MapMuxing, au sein de l'équipe de recherche en cartographie et géomatique (COGIT) de l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN), producteur cartographique institutionnel de l'état français. Elle s'inscrit plus particulièrement dans l'axe de recherche en **géovisualisation**, discipline qui couvre l'ensemble des méthodes et outils de visualisation permettant l'exploration interactive de données géographiques [MacEachren et Kraak, 1997].

Sans s'y limiter, le projet MapMuxing s'inspire particulièrement des besoins d'une salle de gestion de crise lors d'un tsunami dans les Caraïbes. Dans cette situation, des décisions vitales doivent être prises très rapidement, à partir de la visualisation et de l'analyse de données hétérogènes. Ce **cas d'application** a volontairement été choisi pour couvrir une configuration complexe :

- multiples utilisateurs impliqués (interactions collaboratives, interactions simultanées)
- supports de visualisation variés (papier, smartphone, ordinateur, mur d'écrans),
- expérience de l'utilisateur variée (cartographes, experts métiers, sauveteurs, grand public),
- tâches cartographiques diverses (navigation, analyse, comparaison de cartes),
- représentations de natures différentes (carte, photographie aérienne, plan d'évacuation),
- données de temporalités différentes (avant, pendant, après la crise, en temps réel ou non),
- données de dimensions différentes (plan d'évacuation en 2D, modèle de crue en 3D),
- données à échelles différentes (nombreux dommages constatés localement, mais zone géographique globale à visualiser très vaste),
- données de styles cartographiques différents (style et légende dépendant de chaque pays impliqué).

Ce cas d'application soulève de nombreuses problématiques concernant la visualisation de données hétérogènes, aujourd'hui identifié comme un enjeu majeur pour le domaine de la cartographie. Les travaux du projet MapMuxing montrent que les méthodes et outils existants pour la représentation

[1] Source : http://www.internetworldstats.com/stats.htm, consulté en août 2017
[2] http://mapmuxing.ign.fr, projet financé par l'Agence Nationale de la Recherche [ANR-14-CE24-0011-01]
[3] Équipe IGN/LaSTIG/COGIT http://recherche.ign.fr/labos/cogit/accueilCOGIT.php
[4] Equipe INRIA/ILDA https://www.inria.fr/equipes/ilda
[5] UMR GRED www.gred.ird.fr

et la visualisation de données cartographiques peuvent être améliorés pour **faciliter leur utilisation** [Lobo et al., 2015]**.** Ce projet étudie également des méthodes de conception et d'évaluation de **représentations cartographiques mixtes**, « *construites à partir de données hétérogènes, qui n'étaient pas destinées à être utilisées conjointement* » [Hoarau 2015, p12].

L'objectif général est de proposer des méthodes de représentation, visualisation et interaction plus **efficaces**, pour permettre à l'utilisateur de réaliser des tâches impliquant des données cartographiques hétérogènes plus facilement et rapidement. Nous considérons dans nos travaux la définition de l'efficacité suivante : « *Si, pour obtenir une réponse correcte et complète à une question donnée et à toutes choses égales, une construction requiert un temps de perception plus court qu'une autre construction, on dira qu'elle est plus* ***efficace*** *pour cette question* » [Bertin 1967, p139]. En parallèle, nous considérons également l'efficacité d'un utilisateur pour une tâche donnée, comme la précision, la rapidité et la facilité, physique et cognitive, avec lesquelles il réalise une tâche donnée.

Dans cette thèse, nous nous limitons aux problématiques que posent la conception et la visualisation de données cartographiques à échelles différentes. Nous nous intéressons particulièrement aux **cartes multi-échelles,** que nous introduisons dans le paragraphe suivant. Nous nous appuierons sur le cas d'application du projet MapMuxing pour identifier des tâches cartographiques impliquant l'utilisation de cartes multi-échelles, ainsi que leurs problématiques. Cependant, nous nous réservons la possibilité d'étudier dans nos travaux des problématiques, cas d'application ou zones d'étude qui dépasseraient le cadre du projet MapMuxing.

I.3. Objet d'étude : la carte topographique multi-échelle

Les **cartes multi-échelles** sont visualisables dans une interface de navigation multi-échelle, telle qu'un géoportail. Une carte multi-échelle est donc une carte dynamique, dans laquelle l'utilisateur peut naviguer en changeant d'emprise géographique à une même échelle (opération de déplacement ou **pan**) ou en changeant d'échelle (opération de **zoom** avant ou arrière). La Figure 1 présente un extrait de la carte multi-échelle Scan Express produite par l'IGN [Lafay et al., 2015], qui servira de cas d'application dans cette thèse.

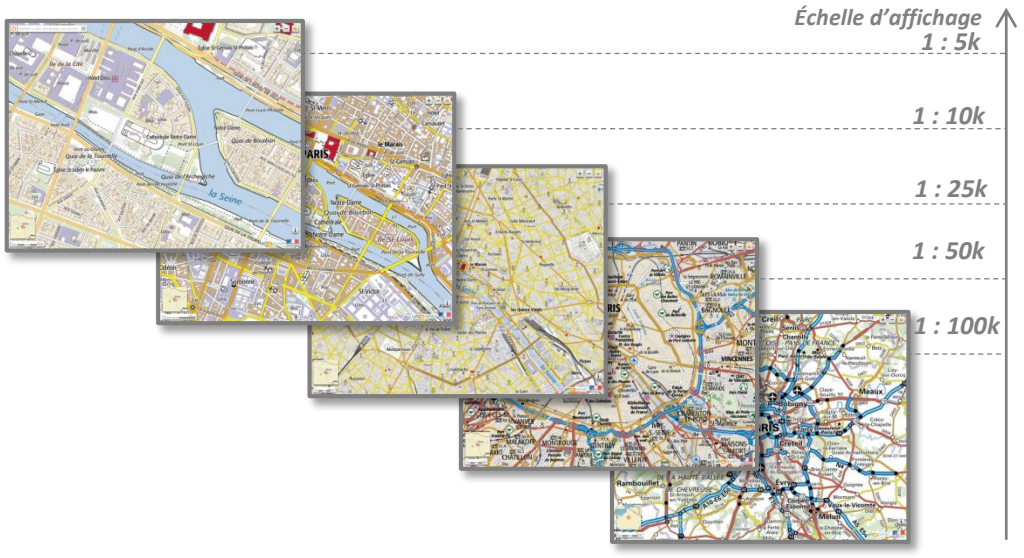


Figure 1. Extrait de la carte multi-échelle Scan Express, produite par l'IGN [Lafay et al., 2015].

Nous définissons l'**échelle d'affichage** comme le rapport de réduction mathématique entre la taille d'un objet à l'écran et sa taille sur le terrain. Lorsque l'utilisateur effectue une opération de zoom, l'échelle d'affichage change et le contenu cartographique affiché à l'écran peut aussi changer, pour s'adapter à l'échelle et préserver la lisibilité de la carte.

Dans cette thèse, nous choisissons d'étudier plus particulièrement la **carte topographique multi-échelle**, c'est-à-dire une carte multi-échelle représentant la topographie du territoire, ou l'ensemble « *des éléments naturels et artificiels situés sur la surface terrestre, ainsi que des formes du terrain* » [AFT 2000].

Nous distinguons ici la **carte topographique** du **fond de carte topographique**, c'est-à-dire l'« *ensemble des éléments repris des cartes topographiques, utilisés dans une carte thématique comme repérage géographique, et indispensables à la structuration et à la validité d'interprétation de l'espace représenté* » [Béguin et Pumain, 2010]. Les producteurs cartographiques non spécialisés fournissent généralement des fonds de carte, au contenu simplifié et aux couleurs atténuées, comme Google Maps ou OpenStreetMap par exemple, que la Figure 2 compare à la carte topographique Scan 100® de l'IGN.

Certains producteurs cartographiques institutionnels proposent désormais une version différente de leur carte topographique multi-échelle, adaptée à ces nouveaux besoins. C'est le cas de l'IGN, dont la différence entre les deux versions est présentée dans la Figure 3. On peut également citer les travaux en ce sens de l'Ordnance Survey en Grande-Bretagne [Revell et al., 2011] ou du Lantmäteriet en Suède [Johansson et al., 2017].

Figure 2. Comparaison entre fonds de carte topographiques (Google Maps à gauche, OpenStreetMap au milieu) et carte topographique (Scan 100® de l'IGN à droite).

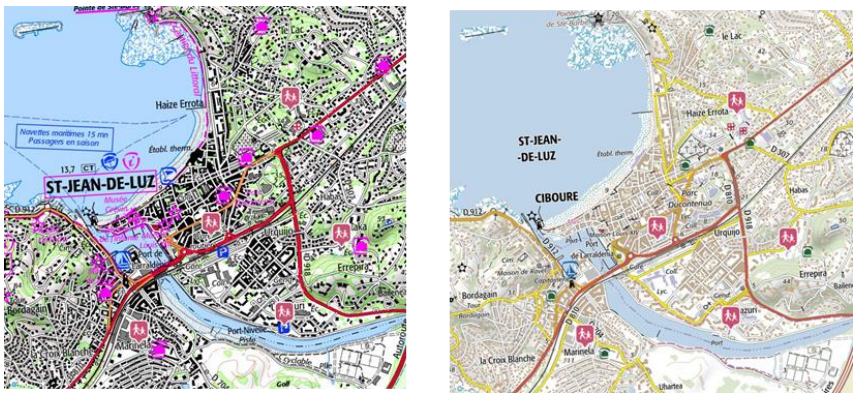


Figure 3. Exemple d'adaptation de la carte topographique de l'IGN (Scan 25® à gauche) à une vocation de fond de carte (Scan Express 25 à droite).

Si l'on met de côté cet aspect thématique, on observe tout de même un changement de rôle de la carte topographique. Initialement destinée à réaliser un inventaire précis et complet du territoire [Béguin et Pumain, 2010], elle en reste aujourd'hui une représentation de référence mais doit s'adapter à de **nouveaux cas d'utilisation** [Carter 2005 ; Boér et al., 2013] que nous résumons ici :

- navigation in situ, lorsque l'utilisateur se trouve lui-même dans l'espace géographique représenté ;
- localisation et mise en relation de points d'intérêt sur la carte, par exemple suivi d'un itinéraire ;
- découverte/exploration d'un référent géographique distant, de manière virtuelle.

Pour faciliter ces nouveaux cas d'utilisation, nous pensons que les cartes topographiques multi-échelles doivent à la fois :
(1) avoir un **contenu suffisamment riche** pour permettre une navigation virtuelle et donc permettre à l'utilisateur de reconnaitre le référent géographique, même à distance de celui-ci ;
(2) avoir une **complexité visuelle maitrisée** quelle que soit l'échelle d'affichage, pour permettre une utilisation in situ, sur un support mobile dont la taille d'écran et les interactions sont parfois limitées ;
(3) permettre une **navigation fluide**, c'est-à-dire assez facile à comprendre et à utiliser, pour que l'utilisateur puisse réaliser facilement et rapidement une tâche cartographique multi-échelle, c'est-à-dire une tâche nécessitant l'analyse, la compréhension et l'utilisation de cartes à différentes échelles.

I.4. Problématique de la thèse : Améliorer la fluidité de navigation dans une carte topographique multi-échelle

La définition-même des cartes topographiques spécifie que leur contenu à grande échelle soit suffisamment riche **(1)** pour permettre à l'utilisateur de naviguer virtuellement dans une représentation d'un référent géographique distant. La préservation de cette richesse à moyenne et petite échelle doit être assurée par la **généralisation cartographique**, qui simplifie l'information pour garantir la lisibilité de la carte mais conserve l'essentiel de son message **(1 et 2)**. Nous considérons que les producteurs institutionnels maitrisent aujourd'hui suffisamment les processus de généralisation [Duchêne et al., 2014] pour tenter de répondre à ces deux premiers objectifs dans leurs cartes multi-échelles.

En revanche, ce n'est pas toujours le cas pour les fonds cartographiques non institutionnels comme Google Maps, Bing Maps ou OpenStreetMap. En effet, pour Google Maps et Bing Maps, le contenu à grande échelle est déjà très simplifié : très peu d'informations sont représentées et elles sont géométriquement peu détaillées. Leur contenu est encore plus épuré aux petites échelles, par une élimination des éléments les plus détaillés. Dans le cas d'OpenStreetMap, qui est plus détaillée qu'une carte topographique IGN à grande échelle comme le montre la Figure 2, le manque de généralisation implique que le contenu cartographique est souvent trop complexe pour être lisible [Das et al., 2012]. Néanmoins, les statistiques de fréquentation [Parsons 2014 ; IGN 2017] montrent aujourd'hui une préférence des utilisateurs, grand public notamment, pour ces cartes multi-échelles, où la richesse de contenu **(1)** et/ou la complexité d'information **(2)** sont mal maitrisées. Nous pensons donc que **la fluidité de navigation** **(3)** est particulièrement importante pour l'utilisateur.

La fluidité de navigation dans une carte multi-échelle relève aussi bien de l'interface de visualisation que de son contenu. Pour que l'utilisateur puisse réaliser plus facilement et rapidement une tâche de

navigation cartographique, nous pensons que **l'interface de visualisation** doit être simple, pratique, réactive et intuitive. Bien que le domaine de recherche en IHM conduise encore des recherches pour améliorer ces aspects, nous considérons que les interfaces existantes sont aujourd'hui suffisamment efficaces pour réaliser des tâches de navigation de manière relativement rapide et facile. Généralement produits par des géants du numérique (Google, Microsoft, Apple), les géoportails non institutionnels ont été pionniers dans l'utilisation de ces avancées technologiques. Les géoportails institutionnels en revanche, ont mis plus de temps à s'adapter, mais une grande majorité propose désormais des interfaces de qualité similaire. Nous n'aborderons donc pas dans cette thèse l'amélioration de l'interface utilisateur en elle-même et utiliserons dans la mesure du possible les technologies existantes les plus efficaces. Cependant, nous étudierons les spécifications de l'interface relatives à la visualisation multi-échelle du contenu cartographique, notamment le système et les niveaux de zoom utilisés. Précisons également que nous n'aborderons pas la question des interfaces de visualisation permettant le contrôle des couches cartographiques affichées (Google Earth par exemple), qui permettent de mieux adapter la lisibilité et le contenu de la carte aux besoins de l'utilisateur.

Nous définissons ici une **transition de représentation** comme l'ensemble des changements de représentation, visuels ou sémantiques, qui interviennent entre deux échelles différentes d'une carte multi-échelle. Concernant ces transitions de représentation, ce qui fait la faiblesse des cartes multi-échelles non institutionnelles fait aussi leur force. Leur contenu cartographique changeant très peu, que ce soit en termes de symbolisation, de géométrie ou de généralisation, les **transitions de représentation** sont assez simples. À l'inverse, les cartes multi-échelles institutionnelles sont construites à l'aide de processus de généralisation complexes. La simplification du contenu cartographique peut alors être drastique lorsque le saut d'échelles est important, impliquant d'**importants changements** de représentation entre les différentes échelles. Nous constatons que la transition de représentation entre deux échelles d'affichage peut alors être difficile à appréhender par l'utilisateur. Il doit parfois fournir un **effort cognitif important** pour reconnaitre l'espace géographique représenté, ou pour retrouver la localisation d'un point d'intérêt. Pour permettre une navigation fluide, nous pensons que le contenu cartographique doit être suffisamment riche et lisible à n'importe quelle échelle comme mentionné plus haut, mais aussi qu'il doit **évoluer de manière progressive et cohérente** au fil des échelles.

Dans cette thèse, nous étudions **cette évolution de représentation** du contenu cartographique au fil des échelles. Nous proposons des méthodes d'**amélioration des cartes topographiques multi-échelles** existantes, visant à faciliter la navigation de l'utilisateur, pour lui permettre de réaliser **plus facilement et rapidement** des tâches impliquant des données cartographiques à échelles différentes.

Dans une première partie, nous dressons un **état de l'art** des travaux pertinents pour notre thématique de recherche, ainsi qu'une liste des verrous scientifiques auxquels nous allons faire face. Nous situons ainsi notre problématique dans le contexte de la recherche en cartographie, en géovisualisation et en interaction homme-machine. En nous appuyant sur cet état de l'art, nous reformulons ensuite nos objectifs, puis donnons le plan de ce mémoire.

Chapitre A
Conception, Visualisation et Évaluation de Cartes Topographiques Multi-Échelles

Dans ce chapitre, nous dressons un état de l'art des domaines de recherche connectés à nos travaux, en détaillant les travaux pertinents pour notre problématique et les verrous scientifiques auxquels nous nous intéressons. Nous présentons ainsi le processus de conception de cartes topographiques à différentes échelles, notamment par généralisation cartographique (§A.1) ainsi que son adaptation à la production de cartes topographiques multi-échelles (§A.2). Nous présentons ensuite des méthodes et outils existants pour la visualisation de représentations cartographiques hétérogènes, dont les cartes multi-échelles (§A.3). Puis nous commentons l'intérêt pour nos travaux de différentes méthodes existantes pour l'évaluation de représentations cartographiques (§A.4). Enfin, nous reformulons les objectifs de cette thèse à partir de cet état de l'art et donnons le plan de ce mémoire (§A.5).

A.1. Conception et Généralisation de Cartes à Différentes Échelles

Les cartes multi-échelles que nous étudions dans cette thèse sont composées de plusieurs cartes topographiques à échelles différentes, chacune obtenue par un processus de conception et de généralisation cartographique adaptés à son échelle. Après un bref rappel du processus de représentation de l'information géographique (§A.1.1), nous présentons ici la problématique de l'échelle cartographique (§A.1.2), puis de la généralisation cartographique (§A.1.3). L'automatisation de ce processus (§A.1.4) et son implémentation en pratique par les producteurs institutionnels (§A.1.5) sont ensuite développées.

A.1.1. Représentation de l'Information Géographique

L'**information géographique** est définie comme « *un ensemble reliant une information relative à un objet ou un phénomène du monde terrestre, décrit plus ou moins complètement par sa nature, son aspect et ses attributs […], et sa localisation sur la surface terrestre, décrite dans un système de référence explicite* » [Denègre et Salgé, 2004].

Pour représenter l'espace géographique sur une carte, il faut donc d'abord faire l'acquisition des objets qui le composent, que l'on décrit numériquement par leurs caractéristiques spatiales (géométrie, localisation) et sémantiques (fonction, nature) à travers des attributs. Informatiquement cette description est stockée sous forme de données géographiques, qui peuvent être de deux types, illustrés par la Figure 4 : le mode **vecteur**, où chaque entité géographique est décrite par une géométrie ponctuelle, linéaire ou surfacique, composée de points localisés dans un système de coordonnées de référence ; ou le mode maillé ou **raster**, qui décompose l'espace géographique en quadrillage régulier où une cellule est appelée pixel. Le mode raster est principalement utilisé pour représenter les phénomènes continus comme l'altitude, la température ou les hauteurs d'eau. **Dans nos travaux, nous considérerons uniquement des données géographiques au format vecteur pour construire des cartes multi-échelles**. Cependant, nous montrerons par la suite que pour des questions de performances, ces cartes sont généralement diffusées au format raster, indépendamment du format de leurs données sources.

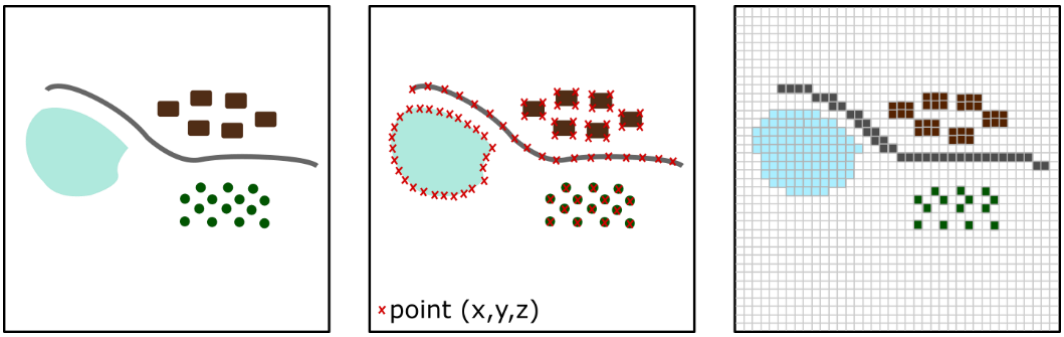


Figure 4. Différents modes de représentation d'une scène (à gauche) : vecteur (au milieu) ou raster (à droite).

Ces données sont organisées dans une **base de données géographique (BDG)**, composée de plusieurs classes d'objets comme n'importe quelle base de données, mais ayant en plus une dimension spatiale avec un système de coordonnées et une emprise géographique spécifiques. Aujourd'hui, les producteurs cartographiques institutionnels ont pour mission de fournir un **référentiel** décrivant l'information géographique sur l'ensemble de leur territoire, c'est-à-dire un

ensemble de bases de données contenant les informations géographiques nécessaires à la représentation et à la localisation des données de ses utilisateurs métiers ou grand public [Portet 2013]. A titre d'exemple, l'IGN produit le Référentiel à Grande Échelle (RGE®) composé de cinq BDG détaillées à thématiques différentes, dont fait partie la BD TOPO®, base de données topographique vectorielle décrivant en détail les éléments du territoire et de ses infrastructures.

Les données d'une BDG peuvent ensuite être visualisées ou interrogées dans un **logiciel SIG**, où l'on peut choisir les données à afficher, puis définir une symbolisation personnalisée pour les représenter et ainsi créer une carte. Les producteurs cartographiques produisent ainsi des cartes topographiques à partir de ces BDG, à différentes échelles et parfois avec des légendes différentes pour s'adapter aux différents besoins des utilisateurs.

A.1.2. Échelle Cartographique, Niveau de Détail et Lisibilité

On définit l'**échelle cartographique** comme le rapport mathématique entre une distance sur la carte et la distance équivalente sur le terrain. Par exemple, dire qu'une carte est réalisée à l'échelle 1 : 25 000 ou 1 : 25k signifie qu'une distance d'1 mm sur la carte correspond à 25 m sur le terrain. Dans ce paragraphe, nous expliquons pourquoi et comment les cartographes produisent des cartes à différentes échelles.

Le besoin de représenter l'espace géographique à **différentes échelles** a d'abord été identifié par les géographes qui considèrent que l'information et le niveau d'analyse proposé doivent s'adapter selon l'échelle d'observation souhaitée [Racine 1981, p141]. La quantité et la complexité d'information que l'être humain est capable de comprendre et d'analyser sont en effet limitées. Les cartographes considèrent ainsi que chaque phénomène géographique a une **échelle caractéristique**, « *la plus appropriée pour [le] rendre sensible au lecteur* » [CFC 1970], mais aussi des **échelles limites**, « *en deçà ou au-delà desquelles il perd sa signification* » [CFC 1970]. La Figure 5 illustre un exemple de cette limitation pour la représentation du bâti individuel. Si on la représente à une échelle trop grande (à droite sur la Figure 5), cette représentation sera trop pauvre pour être pertinente. Si on la représente à une échelle trop petite cette fois (à gauche sur la Figure 5), sa lisibilité n'est plus garantie.

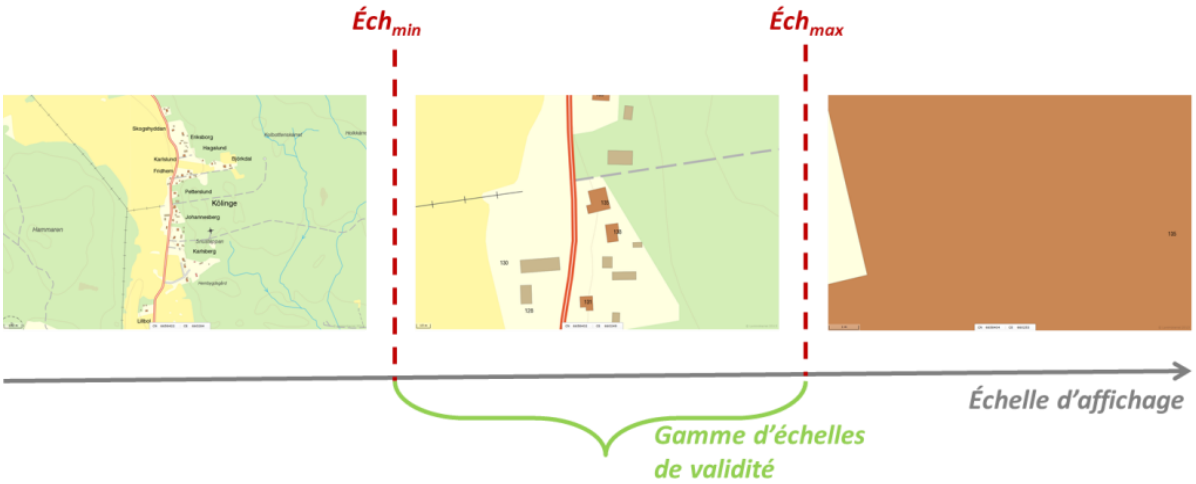


Figure 5. Un phénomène géographique a une gamme d'échelles de validité, au-delà de laquelle sa représentation ne sera plus significative.

Les gammes d'échelles traditionnellement proposées par les producteurs cartographiques institutionnels, avec des cartes aux 1 : 25k, 1 : 50k, 1 : 100k, 1 : 250k et 1 : 1M [Duchêne et al., 2014], correspondent d'ailleurs en partie aux gammes d'échelles identifiées par Yves Lacoste, qui considère qu'il existe « *des niveaux de représentation qu'il est efficace de séparer systématiquement par la pensée* » et définit six ordres de grandeurs [Lacoste 1980, p21], qui correspondent :

- au monde – du 1 : 10M au 1 : 100M,
- aux continents – du 1 : 1M au 1 : 10M,
- aux états – du 1 : 500k au 1 : 1M,
- aux régions – du 1 : 50k au 1 : 200k,
- aux agglomérations – du 1 : 20k au 1 : 50k,
- aux quartiers – du 1 : 1k au 1 : 10k.

Si une BDG n'a donc pas d'échelle cartographique au sens mathématique du terme, puisqu'elle n'a pas de règles de représentation associées, on considère néanmoins qu'elle a une **gamme d'échelles de validité** [Ruas 2004, p29], définie par l'ensemble des échelles limites des phénomènes géographiques qu'elle décrit et déterminée par le **niveau de détail** avec lequel elle modélise l'espace géographique, défini selon [Ruas 2004, p25] par :

- la richesse sémantique, correspondant au schéma conceptuel décrivant les classes d'objets représentées et leurs attributs ;
- la résolution géométrique, correspondant à l'ordre de grandeur des objets représentés, au sens de [Lacoste 1980, p23] ;
- la précision géométrique, correspondant à l'écart entre la position des objets géographiques sur le terrain et sur la carte ;
- la granularité, correspondant à la taille des plus petites entités représentées.

Des travaux existants proposent des méthodes d'évaluation de ce niveau de détail [Touya et Reimer, 2015], en se basant d'ailleurs sur des ordres de grandeurs similaires à ceux de Lacoste. Pour représenter les données d'une BDG en deçà de sa gamme d'échelles de validité, il faudra donc **simplifier son niveau de détail** et parfois effectuer d'importantes modifications sur les données initiales, voire en créer de nouvelles. On dira alors que l'on crée une nouvelle BDG moins détaillée. Précisons ici si nécessaire que nous n'évoquons pas l'utilisation d'une BDG au-dessus de sa gamme d'échelles de validité, car il serait alors nécessaire d'augmenter le niveau de détail, c'est-à-dire la précision et la richesse avec lesquelles l'espace géographique est décrit, ce qui n'est bien sûr pas possible sans acquisition de nouvelles données.

L'échelle cartographique donne également une indication sur la place dont dispose le cartographe pour représenter une portion de l'espace géographique sur la carte. Mathématiquement, plus l'échelle diminue, plus cette place est limitée. Pour respecter les limites de l'acuité visuelle de l'être humain et garantir la **lisibilité de la carte** à une échelle donnée, le cartographe devra donc aussi adapter sa représentation cartographique. Notamment, si l'on n'adapte pas la taille des objets à l'échelle, ils risquent d'être trop petits pour que le lecteur puisse les distinguer correctement. Il est donc souvent nécessaire d'exagérer leur représentation, en grossissant la largeur des routes, la taille des bâtiments ou la police des toponymes par exemple. Basée sur l'étude des capacités de la perception visuelle, la littérature en cartographie propose ainsi des **seuils de lisibilité** pour les cartes imprimées [Cuenin 1972, p163-166; Salitchev 1983] résumés dans la Figure 6.

Cependant, ces grossissements impliquent souvent des **conflits spatiaux**, lorsque les objets entrent en collision parce qu'il n'y a pas assez d'espace libre sur la carte, ou lorsqu'ils sont trop proches pour être distingués, ce qui peut nuire à la compréhension de la carte. Il faut alors les déplacer pour les éloigner les uns des autres, voire en éliminer une partie. Ces modifications de l'information initiale impliquent aussi que la représentation cartographique s'éloigne de plus en plus de la réalité géographique. Cet écart doit être maitrisé pour s'assurer que la précision des données corresponde bien aux besoins des utilisateurs. Le cartographe doit donc chercher à résoudre le conflit d'espace, tout en respectant les trois contraintes suivantes : la taille des objets doit respecter les seuils de lisibilité, ils doivent être assez éloignés pour être discernables, mais leur représentation doit rester cohérente avec la réalité et suffisamment proche de l'information initiale, en fonction des besoins visés.

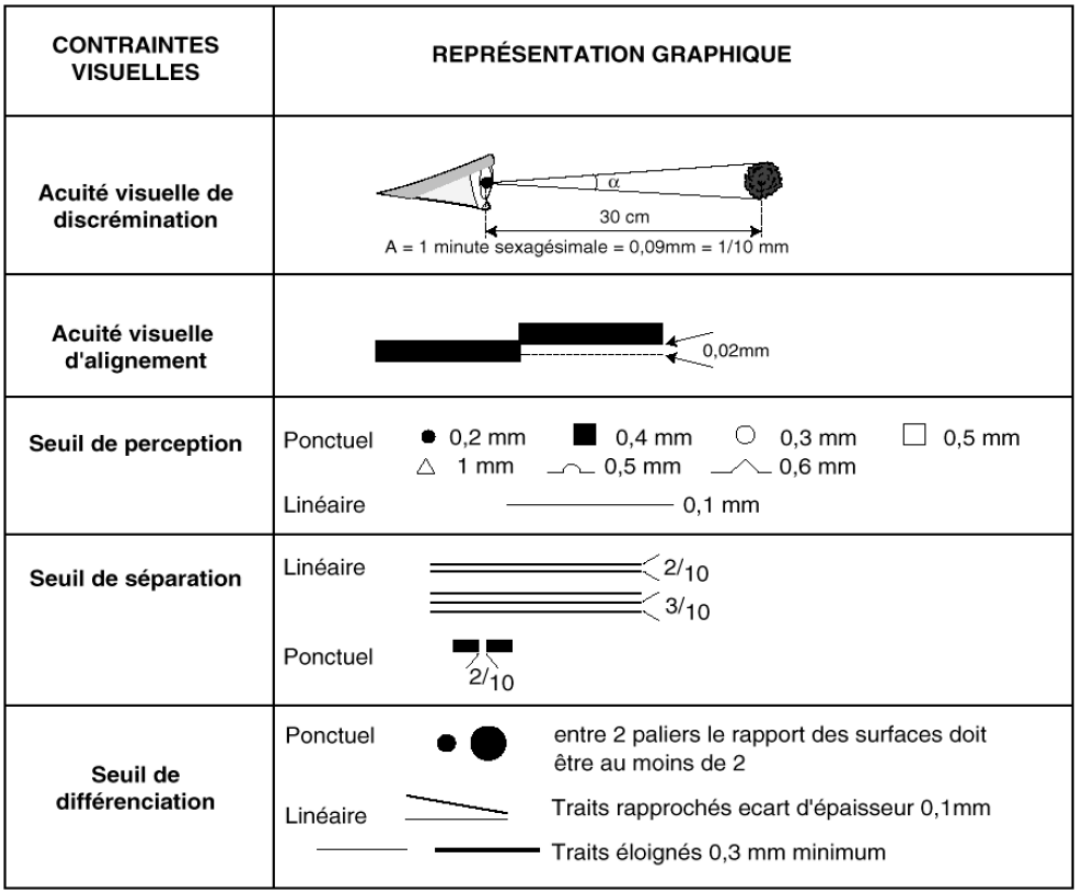


Figure 6. Exemples de seuils de lisibilité dans une carte imprimée, extrait de [Weger 1999, p25].

Lorsqu'on représente l'espace géographique à plus petite échelle, ce problème devient insoluble si l'on ne simplifie pas drastiquement le contenu de la carte. Plutôt que d'éliminer une grande partie des objets initiaux et ainsi modifier l'information initiale, le cartographe pourra ici utiliser une **représentation moins détaillée du contenu cartographique** pour préserver les caractéristiques principales de l'espace géographique. Par exemple à petite échelle, on pourra représenter la répartition des bâtiments individuels en zone urbaine par des ilots urbains.

On utilise le terme de **base de données cartographique (BDC)** pour désigner une BDG qui a ainsi été transformée pour être cartographiée à une échelle donnée [Ruas 2004, p28]. Pour produire une BDC à une échelle donnée à partir d'une BDG, il faut donc :

- abstraire la description de l'espace géographique pour diminuer le niveau de détail,
- simplifier la complexité graphique de la carte pour assurer sa lisibilité,
- tout en préservant les caractéristiques principales de l'information initiale.

L'ensemble de ces opérations forment un processus de **généralisation cartographique**. La Figure 7 compare ainsi l'amélioration apportée par la généralisation à une simple réduction « photo » de la carte initiale, plus détaillée.

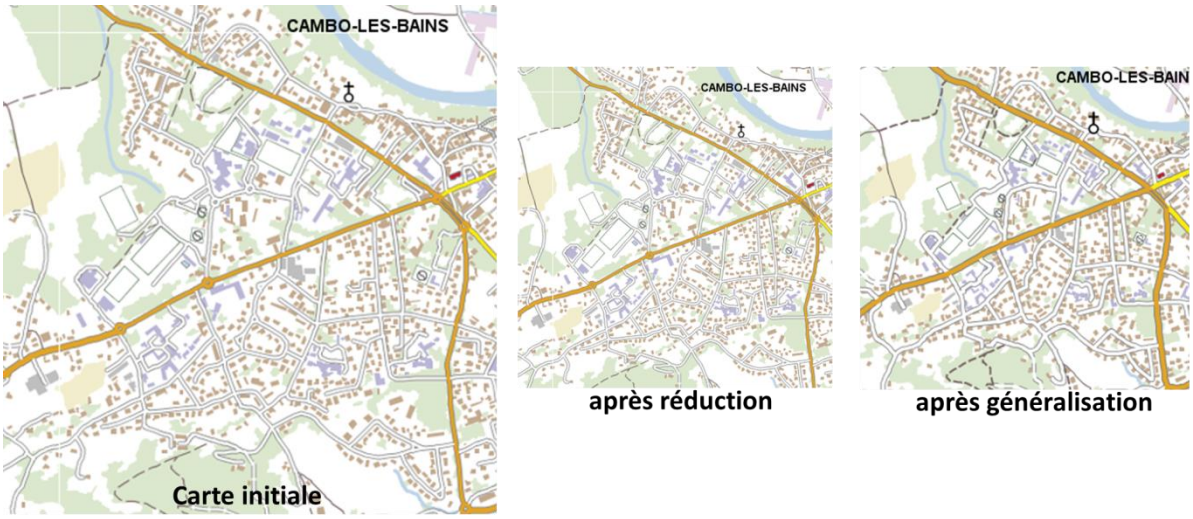


Figure 7. Comparaison entre une version généralisée et une simple réduction "photo" d'une carte plus détaillée.

A.1.3. Processus de Généralisation Cartographique

Dans le domaine de la cartographie, le terme de généralisation peut couvrir différents concepts, illustrés par la Figure 8. Ainsi, la **généralisation « de modèle »** ou « de bases de données » [Weibel et Dutton, 1999 ; Ruas 2004, p37] concerne la simplification du schéma conceptuel de données et la répercussion de cette simplification au niveau de ses instances, c'est-à-dire la manière dont est modélisé l'espace géographique en classes d'entités puis en objets décrits par une géométrie et une série d'attributs. Ce type de généralisation ne prend pas en compte les contraintes liées à la représentation cartographique des données. Comme représenté en bleu sur la Figure 8 cela équivaut à créer une nouvelle BDG moins détaillée à partir des données initiales. A l'inverse, le terme de **généralisation graphique** [Harrie et Sarjakoski, 2002] considère les transformations nécessaires pour respecter les contraintes de lisibilité lorsque l'on prend en compte la légende finale de la carte, c'est-à-dire l'ensemble des symbolisations utilisées. C'est donc le processus qui permet de dériver une BDC à partir d'une BDG, illustré en vert sur la Figure 8. Enfin, le terme de **généralisation cartographique** est utilisé pour cibler la production et la simplification d'une carte à une échelle donnée, à partir d'une BDG plus détaillée, voire directement à partir d'une BDC à plus grande échelle [Weibel et Dutton, 1999 ; Ruas 2004, p40], en rouge sur la Figure 8.

Cependant, certains auteurs parlent également de généralisation cartographique pour désigner la production d'une BDC à partir d'une BDG [Grunreich 1985]. Ces différentes terminologies peuvent donc présenter des ambiguïtés et dépendent avant tout du type de produit considéré (carte ou base de données), du saut d'échelles à résoudre et du point de vue adopté par l'auteur [Ruas 2004, p41-44].

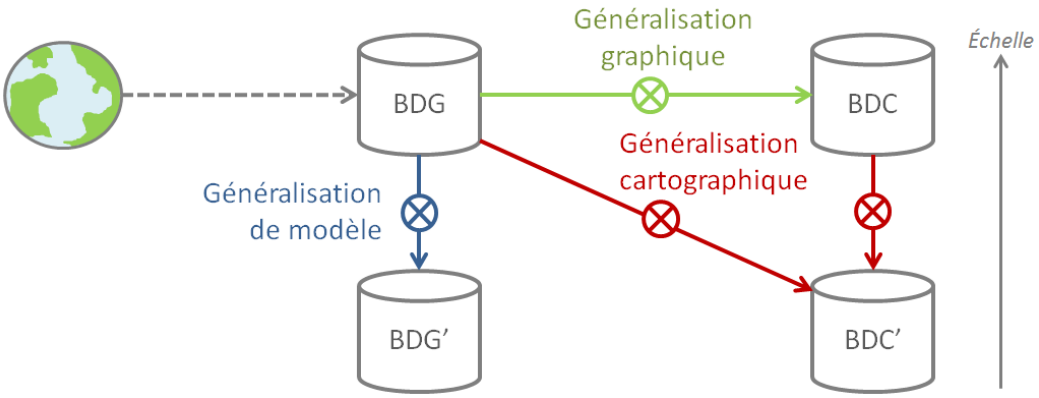


Figure 8. Illustration des termes utilisés pour désigner les différents types de généralisation.

A l'instar de [Ruas 2004, p44], nous faisons ici le choix de définir le **processus de généralisation cartographique** comme l'ensemble des transformations aussi bien du schéma conceptuel de données que du rendu cartographique, qui permettent de produire une représentation cartographique adaptée à une échelle donnée, à partir de données plus détaillées.

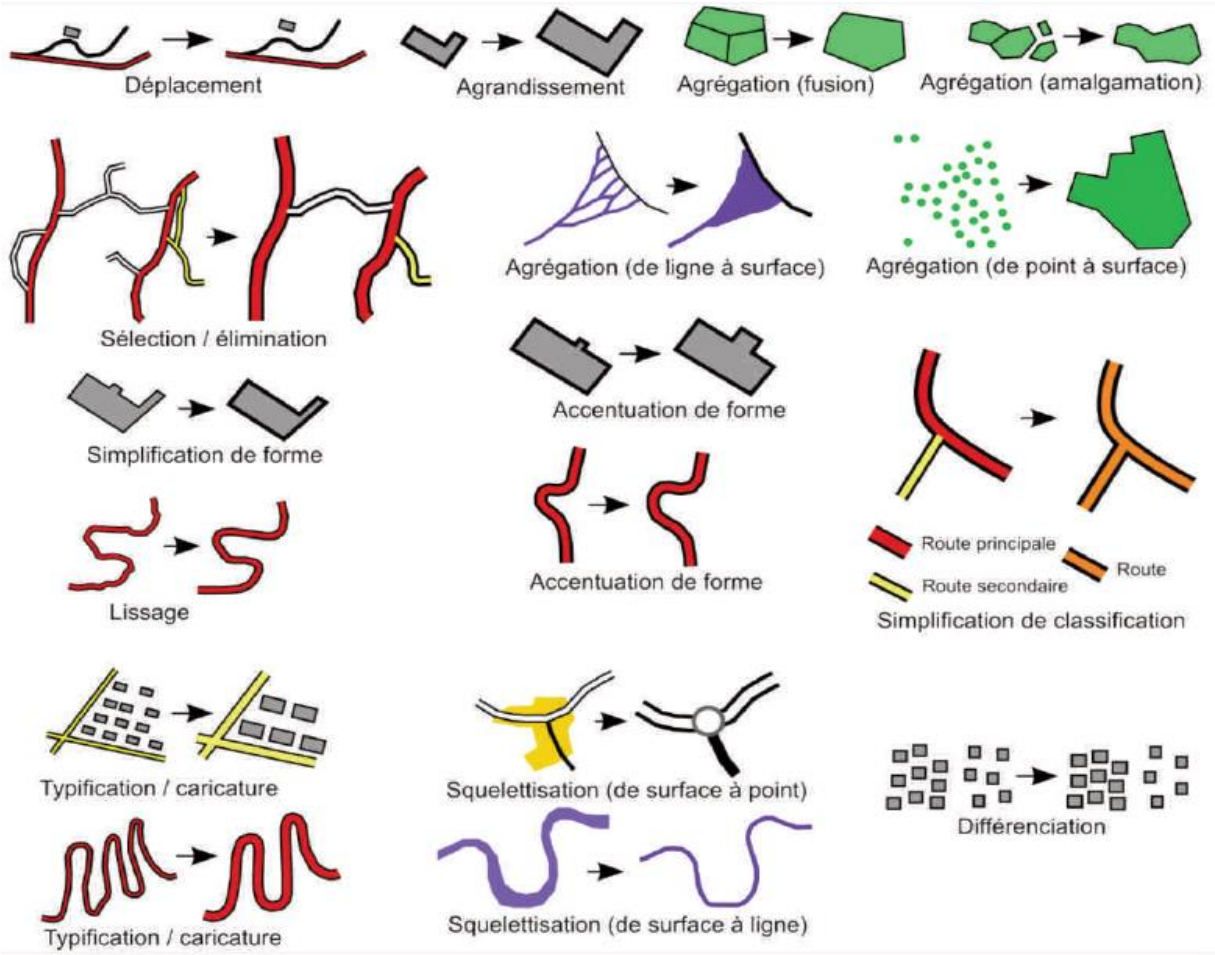


Figure 9. Exemples d'opérateurs de généralisation susceptibles d'être utilisés dans cette thèse, illustrés et définis par [Mustière 2001].

Les **opérateurs de généralisation** représentent les types de transformations utilisées dans un processus de généralisation cartographique. Différentes classifications définissant ces opérateurs ont

été proposées dans la littérature [Mustière 2001 ; Regnauld et McMaster, 2007 ; Foerster et al., 2007 ; Roth et al., 2011], sans réel consensus. Nous choisissons ici d'utiliser les définitions issues de [Mustière 2001, p30-35], qui ont notamment l'avantage d'être en français et illustrées. Les principaux opérateurs de généralisation sont ainsi présentés en Figure 9. Pour chaque opérateur de base, il existe plusieurs **algorithmes** ou procédures, qui définissent l'enchainement des transformations à appliquer. Un état de l'art des principaux algorithmes existants peut être trouvé dans [Regnauld et McMacster, 2007 ; Stanislawski et al., 2014].

Réalisée manuellement, que ce soit sur papier ou à l'aide d'un logiciel de DAO, la généralisation est un processus fastidieux qui peut prendre des mois pour une seule carte. **Pour accélérer la production de cartes et notamment permettre la réalisation de cartes à la demande, il est nécessaire d'automatiser les processus de généralisation cartographique**, c'est-à-dire de pouvoir enchainer facilement et rapidement différentes opérations de généralisation, mais aussi de pouvoir s'adapter automatiquement à des besoins utilisateurs variés.

A.1.4. Automatisation de la Généralisation Cartographique

Il est souvent nécessaire d'enchainer plusieurs algorithmes de généralisation pour atteindre un résultat cartographique correct [Ruas et Plazanet, 1996]. Pour enchainer l'application de plusieurs opérateurs et automatiser un processus de généralisation, il faut que les algorithmes utilisés soient implémentés de façon suffisamment standard pour être interopérables [Touya 2011 ; Regnauld et al., 2014] et de façon suffisamment paramétrable pour qu'ils s'adaptent à différents besoins. En effet, le comportement effectif d'un algorithme peut être différent en fonction du thème géographique, du type d'objets, du contexte spatial (rural, urbain) et de la gamme d'échelles traités. Il est souvent nécessaire de modifier un algorithme existant pour l'adapter à un cas d'application différent. Pour être tout-automatique, un processus de généralisation doit donc aussi être capable de s'adapter de lui-même, en répondant aux questions suivantes : **pourquoi**, **quand** et **comment** doit-on généraliser le contenu cartographique considéré ? [McMaster et Shea, 1992].

On généralise le contenu cartographique **parce qu**'il ne respecte pas les spécifications cartographiques attendues, c'est-à-dire les règles de modélisation et de représentation graphique (géométrique et sémantique) dérivées du besoin utilisateur [Balley et al., 2014]. Ces spécifications dépendent des limites de notre perception visuelle, comme mentionné plus haut, mais aussi des règles de représentations culturelles utilisées par le producteur cartographique, ou encore de l'objectif de la carte et donc de son échelle. Ces spécifications sont les **contraintes** du processus de généralisation [Beard 1991].

Ces contraintes peuvent être locales, comme la distance minimale entre une route et un bâtiment, ou plus globales, comme la quantité d'information maximale contenue dans la carte. Certaines contraintes peuvent porter sur des notions géographiques implicites, comme les relations spatiales ou topologiques entre objets [Touya et al., 2014]. Pour prendre en compte ce type de contraintes, il est nécessaire au préalable d'évaluer les relations entre les entités géographiques de la carte et d'enrichir la base des connaissances que l'on possède sur elles [Parent et Spaccapietra, 1996 ; Touya 2011, p18]. Par exemple, si l'on souhaite préserver l'alignement d'un groupe de bâtiments, il faudra détecter ces groupes de bâtiments dans les données initiales, puis attribuer un même identifiant de groupe à chacun des bâtiments. Pour savoir **quand** généraliser, un processus automatique doit ensuite pouvoir détecter une non-satisfaction de ces contraintes, que l'on appelle un **conflit**. Il faut

alors que ces contraintes soient formalisées de manière à ce que le processus les comprenne et puisse les utiliser [Beard 1991], à l'exemple des méthodes proposées dans [Bard 2004 ; Zhang et al., 2008 ; Werder 2009 ; Touya et al., 2010].

Lorsqu'un conflit est détecté, un processus automatique doit également choisir **comment** résoudre le problème, en fonction des objets et des contraintes concernés : quelles opérations de généralisation sont nécessaires, quels algorithmes sont les plus appropriés à ce contexte, comment **orchestrer** l'exécution des différents algorithmes et enfin comment paramétrer chaque algorithme [Brassel et Weibel, 1988 ; McMaster et Shea, 1992 ; Ruas et Plazanet, 1996]. Bien que de nombreuses approches différentes aient été proposées pour automatiser ce processus [Ruas 1999 ; Duchêne 2004 ; Gaffuri 2008 ; Touya 2011], voire pour déterminer automatiquement le paramétrage adéquat [Mustière 2001 ; Taillandier 2008], la modélisation d'un processus de généralisation automatique reste aujourd'hui très coûteuse et n'est valable que pour un cas d'application en particulier. L'adaptation d'un algorithme existant, à d'autres données ou à une autre échelle, n'est donc pas triviale.

Estimer la satisfaction de l'ensemble des contraintes permet d'avoir une évaluation de la qualité du contenu cartographique et donc de valider le paramétrage utilisé. La littérature en généralisation suggère en effet que l'**évaluation** intervienne avant, pendant et après le processus [Weibel 1995], respectivement pour paramétrer les algorithmes ; puis contrôler les améliorations en cours et éventuellement revenir en arrière ou changer la séquence à suivre ; et enfin valider le résultat [Mackaness et Ruas, 2007]. Un état de l'art des méthodes d'évaluation en généralisation peut être trouvé dans [Bard 2004 ; Stoter et al., 2014b]. Nous détaillons également ces notions dans le paragraphe §A.4.1.

Bien que les travaux en généralisation automatique soient assez mûrs pour être désormais appliqués en production, **la variabilité des données et l'adaptabilité limitée des algorithmes de généralisation existants rendent la mise en place d'un processus automatique encore très coûteuse**. Par ailleurs, des verrous subsistent pour atteindre le tout-automatique, notamment concernant l'orchestration des algorithmes, mais aussi des objets traités, en fonction de leur contexte géographique. Par exemple, doit-on traiter d'abord les espaces urbains ou ruraux ?

A.1.5. Pratiques de la Généralisation Automatique en Production

La Commission « *Generalisation and Multiple Representation* »[1] de l'Association Cartographique Internationale a récemment organisé deux workshops, en 2013 et 2015, regroupant une vingtaine de producteurs cartographiques institutionnels. Ces discussions ont notamment permis de confirmer la volonté des producteurs d'automatiser leurs processus de généralisation [Duchêne et al., 2014]. D'une part, cette automatisation permettrait de produire plus rapidement des données institutionnelles et donc de diffuser des mises à jour plus fréquentes. Ce besoin d'actualité semble aujourd'hui une nécessité majeure pour les utilisateurs, qui consomment plus massivement des données non institutionnelles (Google Maps, OpenStreetMap) plus fréquemment actualisées, malgré leur qualité cartographique moindre. D'autre part, un processus automatique leur permettrait d'offrir des services de production de cartes à la demande. Enfin, et sans doute plus important encore, la diminution des moyens humains et financiers des producteurs institutionnels rend

[1] http://generalisation.icaci.org

aujourd'hui cette automatisation indispensable.

Ces rencontres ont également permis de faire un état d'avancement des pratiques de généralisation automatique en production, en considérant les quatre étapes d'implémentation d'un tel processus, listées par [Duchêne et al., 2014] d'après [Stoter 2005 ; Foerster et al., 2010] :

- implémentation de processus de généralisation automatique,
- renouvellement des modèles de données de référence,
- modélisation du processus de dérivation des différentes BDC,
- gestion des relations entre les BDC à différentes échelles.

Basé sur le workshop de 2013, [Duchêne et al., 2014] constate qu'une grande majorité des producteurs présents ont réussi à implémenter et utilisent désormais un processus semi-automatique pour produire leurs cartes topographiques traditionnelles, des interactions manuelles étant encore nécessaires pour résoudre les situations complexes. **Cependant, la mise en place de ces processus automatiques est encore très longue et coûteuse.** Elle est donc pour le moment réservée à une série d'échelles limitée correspondant généralement aux 1 : 25k, 1 : 50k, 1 : 100k, 1 : 250k et 1 : 1M [Stoter 2005 ; Duchêne et al., 2014]. Néanmoins, quelques producteurs ont réussi à mettre en place un processus tout-automatique [Revell et al., 2011 ; Stoter et al., 2014a ; Lafay et al., 2015], en faisant toutefois un compromis sur leurs spécifications cartographiques habituelles. Cette baisse de qualité cartographique est souvent justifiée par la volonté de s'adapter aux besoins de certains utilisateurs, un processus de généralisation plus automatique permettant des mises à jour plus fréquentes des fonds cartographiques.

Pour répondre à leur mission institutionnelle, les producteurs cartographiques produisent une ou plusieurs BDG à grande échelle, décrivant **l'information géographique** de leur territoire. Grâce à un processus de généralisation cartographique, ils peuvent ensuite produire des cartes ou BDC à différentes échelles à partir de ces données détaillées. Le **niveau de détail** et la complexité du contenu cartographique doivent être adaptés à **l'échelle cartographique** visée, car notre perception visuelle et notre capacité d'analyse sont limitées. Pour cela, le processus de **généralisation cartographique** agit aussi bien sur la modélisation des données que sur leur rendu graphique. Pour produire des cartes actualisées et adaptées aux besoins utilisateurs, les producteurs cartographiques ont dû **automatiser** ce processus.

Cependant, la mise en place d'un processus de généralisation automatique est encore aujourd'hui très longue et coûteuse. Les producteurs institutionnels se cantonnent donc pour le moment à une **série d'échelles limitée**. D'autre part, les seuls producteurs étant parvenus à mettre en place un processus tout-automatique ont dû faire des **concessions sur la qualité** de leurs produits cartographiques. Des verrous scientifiques subsistent donc quant à la généralisation automatique. Cependant, nous choisissons dans cette thèse de **ne pas nous y confronter**. Nous utiliserons donc des processus de généralisation automatique existants, que nous adapterons à nos données et à notre problématique, mais que nous orchestrerons manuellement.

A.2. Généralisation Cartographique Multi-Échelle

Dans une première partie, nous avons abordé le processus de généralisation cartographique, appliqué à la production de cartes ou BDC pour une série d'échelles limitée. Nous développons maintenant les enjeux de la généralisation multi-échelle (§A.2.1), puis nous abordons les approches

de généralisation multi-échelle existantes (§A.2.2). Nous détaillons ensuite les méthodes existantes pour répondre aux besoins identifiés de progressivité (§A.2.3) et de cohérence (§A.2.4) du contenu au fil des échelles. Enfin, nous évoquons les structures de données multi-échelles et leur utilisation en production (§A.2.5).

A.2.1. Enjeux de la Généralisation Multi-Échelle

Nous avons précédemment évoqué le besoin de représenter l'espace géographique à différentes échelles (§A.1.2). Yves Lacoste relevait déjà le besoin de comparer les représentations d'un même phénomène à différentes échelles, en arguant que chaque niveau géographique (cf. ordre de grandeur présenté en §A.1.2) ne permet d'étudier qu'une partie du problème [Lacoste, 1980]. Dans les dernières décennies, les efforts des producteurs cartographiques institutionnels se sont concentrés sur l'élaboration de processus de généralisation pour une série d'échelles limitée, aujourd'hui relativement maitrisée [Duchêne et al., 2014]. Les cartes multi-échelles que nous étudions dans cette thèse sont d'ailleurs généralement constituées de cartes à ces échelles maitrisées, comme nous le montrerons dans la partie §B.3.3.

Cependant, l'évolution des besoins utilisateurs implique la production de cartes à de nombreuses échelles différentes, voire sur tout un intervalle d'échelles. Des travaux en visualisation ont aussi montré que l'acuité visuelle était **généralement moins performante sur écran** que sur papier. D'une part, la représentation est généralement observée à une distance différente, qui impacte donc les seuils minimaux discernables [Jenny et al., 2008]. D'autre part, cette acuité visuelle dépend également de la taille, de la résolution et de la luminosité de l'écran [Ware 2013, Chapitre 2]. Les cartes existantes, adaptées à ces échelles sur papier, ne le sont donc plus forcément une fois visualisées à l'écran. Les producteurs ont donc le besoin actuel de produire de nombreuses nouvelles échelles, plus rapidement et de façon moins coûteuse qu'avec les méthodes existantes que nous avons précédemment présentées. Le domaine de recherche en **généralisation multi-échelle** a donc pour objectif de proposer de nouvelles méthodes et outils permettant de formaliser un processus de généralisation à de nouvelles et multiples échelles.

L'une des problématiques majeures de ce domaine est de définir l'évolution du niveau de détail au fil des échelles que l'on souhaite produire. Cette évolution dépend évidemment des capacités d'analyse et de l'acuité visuelle de l'être humain, mais aussi du cas d'application, des phénomènes décrits et des représentations utilisées. Avec les possibilités de représentation et de généralisation cartographique existantes, nous estimons ici pertinent de considérer le niveau de détail au sens de [Ruas 2004] comme une dimension continue, bien qu'il ne soit pas numériquement exprimé (§A.1.2). **Cependant, son évolution en fonction de l'échelle n'est pas linéaire et reste une vraie problématique pour les cartographes en général. D'autre part, paramétrer un processus de généralisation en fonction du niveau de détail visé reste là aussi une question de recherche.**

Par ailleurs, nous avons déjà évoqué que, plus qu'une simple réduction mathématique, la diminution d'échelle imposait parfois une réduction drastique du niveau de détail avec lequel l'espace géographique est décrit. Lorsque l'utilisateur effectue une opération de zoom dans une carte multi-échelle, il doit donc parfois faire face à ces **changements de représentations importants**, illustrés en Figure 10, qui peuvent le perturber, mais qui sont parfois inévitables pour assurer la lisibilité et la pertinence de la carte aux différentes échelles.

Si l'on reprend la proposition d'Yves Lacoste introduite en §A.1.2, nous constatons que les bornes des ordres de grandeurs sont parfois disjointes. L'auteur explique qu'entre ces niveaux connus et maitrisés, « *se trouve une sorte de hiatus, qui correspond au brusque changement d'échelle* » [Lacoste 1980, p23]. Barbara Buttenfield explique par ailleurs que la représentation des entités cartographiques n'est que légèrement modifiée à certaines échelles, alors qu'elle subit des **changements brusques** à d'autres échelles[1] [Buttenfield 1995, p96], aussi nommés *Change Under Scale Progression* (CUSP) en anglais. Les travaux de [Müller et al., 1995, p11] parlent également de « *catastrophic levels* », quand un changement d'échelle cause d'importants changements de représentation[2]. On retrouve également cette idée de paliers dans les travaux de [Ratajski 1967], où l'auteur nomme **points de généralisation** les échelles où un changement important de représentation est nécessaire, par exemple lorsque l'on doit simplifier le niveau de détail du bâti en passant de la représentation du bâti individuel à celle de l'aire urbaine. Entre ces points de généralisation, la représentation peut souvent être adaptée à l'échelle par une simple diminution de la quantité d'information d'une part et de la complexité graphique d'autre part. Nous relions respectivement ces notions au **degré de sélection** et **degré de généralisation** de [Zhou et Jones, 2003 ; Zhou 2014].

Figure 10. Les cartes multi-échelles existantes peuvent présenter d'importants changements de représentation entre deux niveaux de zoom consécutifs. *Extraits : ICGC Catalogne*.

Si l'on résume ces travaux, il apparait donc que sur certaines gammes d'échelles, des changements mineurs du niveau de détail suffisent à adapter la représentation cartographique, mais qu'il existe des **échelles critiques** auxquelles un changement majeur est nécessaire. Précisons ici que ces notions de points de généralisation ou échelles critiques peuvent varier selon les objectifs de la carte, les phénomènes géographiques décrits, les modélisations et représentations graphiques utilisées voire le contexte local des entités sur la carte. Nous ne cherchons donc pas ici de valeurs universelles ni même de valeurs précises.

[1] « *it has been shown that map features undergo only slight change at some scales and catastrophic change at others* » [Buttenfield 1995, p96]

[2] « *those catastrophic levels where a change between two successive scales in map series may cause large variations in the representation of the objects (where a polygon envelope of a church turns into a cross symbol, for example).* » [Müller et al., 1995, p11]

Si l'on réfléchit maintenant en termes de niveau de détail, il existerait donc des **gammes de niveaux de détail**, au sein desquelles seule la force de simplification appliquée diffèrerait; et entre lesquelles on distinguerait un changement drastique dans l'abstraction avec laquelle on décrit le monde réel dans la représentation cartographique. On retrouve cette idée de gammes dans le format standard CityGML pour la modélisation 3D du bâtiment [OGC 2012], où l'on définit 5 gammes de représentations, illustrées par la Figure 11. Ces gammes, qui décrivent pourtant très peu la quantité d'information et la richesse de la modélisation attendue, sont nommées « niveaux de détail » ou LoD (*levels of detail* en anglais). En revanche, en cartographie et en généralisation qui plus est, le terme *niveau de détail* est une notion précise bien que complexe à mesurer [Ruas 2004, p25-26]. Nous constatons donc ici une hétérogénéité de signification du terme « niveau de détail » dans le domaine de l'information géographique.

Figure 11. Illustration des 5 gammes de niveaux de détail définis pour le format standard CityGML [OGC 2012]. *Source de l'image : TUDelft.*

Pour clarifier notre discours dans la suite de cette thèse, nous dirons que deux représentations cartographiques d'un même phénomène utilisent un même **niveau d'abstraction**, lorsqu'elles utilisent le même type d'implantation géométrique, ainsi qu'une richesse sémantique et une résolution géométrique similaires. Elles pourront en revanche présenter une précision géométrique et une granularité différentes, en fonction de la force de généralisation utilisée. Cet indicateur, plus générique que le niveau de détail, nous permettra de qualifier les représentations utilisées dans les cartes existantes et de comparer leur évolution au fil des échelles, pour **formaliser des connaissances sur la relation entre niveau de détail et échelle d'affichage**.

Dans nos travaux, nous chercherons aussi à mieux comprendre les mécanismes cognitifs impliqués dans la navigation multi-échelle, pour pouvoir identifier les changements susceptibles de perturber l'utilisateur. Nous chercherons également des méthodes permettant de limiter l'impact de ces changements sur la fluidité de navigation perçue par l'utilisateur. Pour cela, nous pensons notamment que la représentation du contenu cartographique doit évoluer de manière **progressive** et **cohérente** au fil des échelles.

Nous présentons dans le paragraphe suivant §A.2.2 les deux approches majeures de généralisation multi-échelle existantes et donnons des exemples de leur implémentation. Puis nous détaillons le potentiel de chacune de ces méthodes pour améliorer respectivement la progressivité (§A.2.3) et la cohérence (§A.2.4) du contenu cartographique au fil des échelles. Enfin, pour permettre l'utilisation des BDC existantes dans une approche multi-échelle, celles-ci doivent être formalisées et structurées d'une nouvelle façon. Nous définissons donc dans le paragraphe §A.2.5 les **structures multi-échelles** existantes, ainsi que leurs avantages et leur utilisation actuelle en production.

A.2.2. Généralisation Multi-Niveaux vs Généralisation Continue

Pour spécifier un processus de généralisation sur une plage d'échelles continue, la littérature propose deux grands types d'approches, que nous appelons généralisation multi-niveaux et généralisation continue. La **généralisation multi-niveaux** consiste à découper la plage d'échelles considérée en plusieurs intervalles adjacents de taille variable, puis à définir le processus de généralisation, les données sources et la symbolisation à utiliser sur chacun d'entre eux. Le principal inconvénient de cette approche est que sur un même intervalle, la représentation du contenu cartographique ne change pas, la carte étant juste agrandie ou réduite visuellement à un facteur près dépendant de l'échelle. La progressivité de l'évolution de la représentation cartographique au fil des échelles est donc limitée au nombre d'intervalles choisi. En revanche, elle présente des avantages non négligeables pour les producteurs institutionnels :

- il est possible de réutiliser les processus de généralisation existants sur les intervalles d'échelles traditionnels ;
- seul un nombre fini de cartes est nécessaire pour spécifier une plage d'échelles entière ;
- il est plus facile de paramétrer un processus de généralisation sur un intervalle d'échelles limité.

Cette approche a notamment été appliquée pour proposer le ScaleMaster [Brewer et Buttenfield, 2007 ; Touya et Girres, 2013], illustré par la Figure 12. Cet outil permet de formaliser un processus de généralisation multi-niveaux sur une plage d'échelles continue. Pour chaque type d'entités géographiques, représenté sur une **ligne différente**, on spécifie un nombre fini d'intervalles d'échelles comme des **cases différentes**. Ainsi, pour mieux adapter le contenu cartographique à l'échelle, on peut appliquer une stratégie différente par type d'entités. Dans la Figure 12, les entités hydrographiques surfaciques et linéaires seront ainsi généralisées différemment des entités ponctuelles entre le 1 : 20k et le 1 : 50k. Pour chaque type d'entités géographiques, on définit donc différents processus de généralisation, spécifié par un **code lettré** (A, B, C, D, E sur la Figure 12), chacun s'appliquant uniquement à un intervalle d'échelles restreint, ce qui facilite son paramétrage. Plusieurs BDC existantes peuvent être utilisées comme source pour généraliser les différents intervalles d'échelles intermédiaires. Dans la Figure 12, deux BDC au 1 : 25k et 1 : 100k sont ainsi utilisées, respectivement représentées par des variations de bleu et de violet.

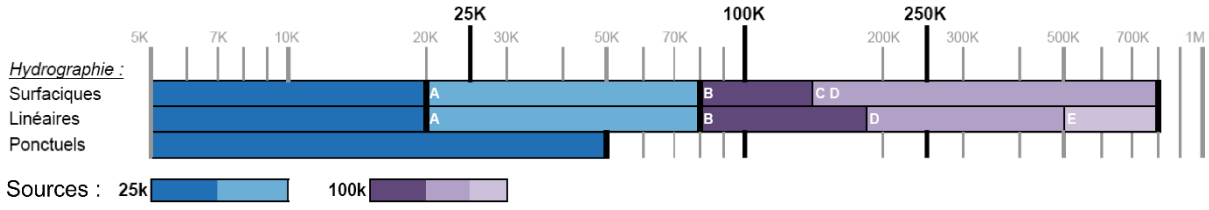


Figure 12. Illustration du ScaleMaster [Brewer et Buttenfield, 2007; Touya et Girres, 2013].

A l'opposé, la seconde approche relève de la **généralisation continue**. Cette approche consiste à définir un unique processus de généralisation pour toute la plage d'échelles considérée, mais dont le paramétrage varie en fonction de l'échelle. Ainsi, un changement d'échelle, même léger, impliquera systématiquement un changement du contenu cartographique. On évite donc les risques de mauvaise lisibilité de la première approche. En revanche, on ne bénéficie pas non plus de ses avantages :

- les processus de généralisation et les cartes existantes seront difficilement réutilisables car les contenus cartographiques déjà produits s'inscriront rarement dans la nouvelle « évolution continue » du contenu au fil des échelles ;
- un nombre infini de cartes sera nécessaire pour naviguer sur une plage d'échelles entière, ce qui peut notamment représenter un problème en terme de performances de transfert de données et d'affichage en ligne ;
- il est très difficile voire impossible de concevoir un processus de généralisation continue sur une large plage d'échelles, étant donné les changements de niveaux d'abstraction dont nous avons parlé précédemment, qui sont par définition impossibles à représenter de façon continue.

Face à ces constats, on souhaiterait évidemment profiter des avantages des deux approches. Des travaux existants proposent donc des **méthodes hybrides**, comme la proposition de [van Kreveld 2001] de partir d'une approche multi-niveaux, avec un nombre fini de représentations à différentes échelles (BDC existantes par exemple) et d'utiliser ensuite des transformations continues pour passer d'une échelle à l'autre.

En se basant sur une approche similaire, les travaux présentés dans [van Oosterom et al., 2014] proposent le « *smooth space-scale cube* », illustré dans la Figure 13 (b). En plus de la proposition de [van Kreveld 2001], les auteurs proposent ici de modéliser uniquement les transformations subies par les entités, pour éviter de stocker de très nombreuses données redondantes. Ces solutions permettent de bénéficier pleinement de la **continuité** visuelle apportée par la généralisation continue, tout en permettant de réutiliser des cartes existantes et en optimisant le stockage des données redondantes. En revanche, ce type de structure écarte théoriquement l'utilisation de certains processus discontinus comme la typification (cf. Figure 9) ou les changements de niveaux d'abstraction, étant donné qu'il n'existe pas dans ce cas, de liens directs entre les géométries des objets élémentaires, avant et après généralisation. **Ces transformations étant inévitables pour proposer une représentation adaptée sur une large gamme d'échelles, nous choisissons de ne pas utiliser ces méthodes dans nos travaux.**

En revanche, la méthode hybride proposée dans [Cecconi et Galanda, 2002] et illustrée par la Figure 14, permettrait quant à elle d'intégrer ces transformations discontinues. En effet, elle propose d'utiliser un nombre fini de représentations multi-échelles (en orange sur la Figure 14) pour les classes d'entités dont la généralisation est complexe à automatiser ou particulièrement coûteuse en temps de calcul. Puis, les autres classes d'entités (en bleu) sont généralisées à la volée pendant la navigation de l'utilisateur, par des processus qui peuvent être continus. Cette approche permet donc une meilleure adaptation du contenu cartographique à l'échelle d'affichage, en intégrant des changements de représentation discontinus. Cependant, elle présente aussi des limites, notamment la difficulté de maintenir les relations topologiques entre les objets qui sont généralisés à la volée ou non [Cecconi et Galanda, 2002]. La cohérence du contenu au fil des échelles étant pour nous une condition importante pour permettre la fluidité de navigation dans une carte multi-échelle, **nous choisissons de ne pas appliquer non plus cette méthode existante.**

A l'image des méthodes existantes, nous pensons que seul un mélange des approches multi-niveaux et continue nous permettrait de proposer une navigation fluide dans une carte multi-échelle. La généralisation continue en particulier nous semble intéressante pour améliorer la progressivité d'évolution du contenu cartographique, comme nous l'expliquons dans le paragraphe suivant. Dans nos travaux, nous considérons que le terme progressif se définit par : « *qui se fait par*

degrés, de manière régulière et continue » [Larousse 2017].

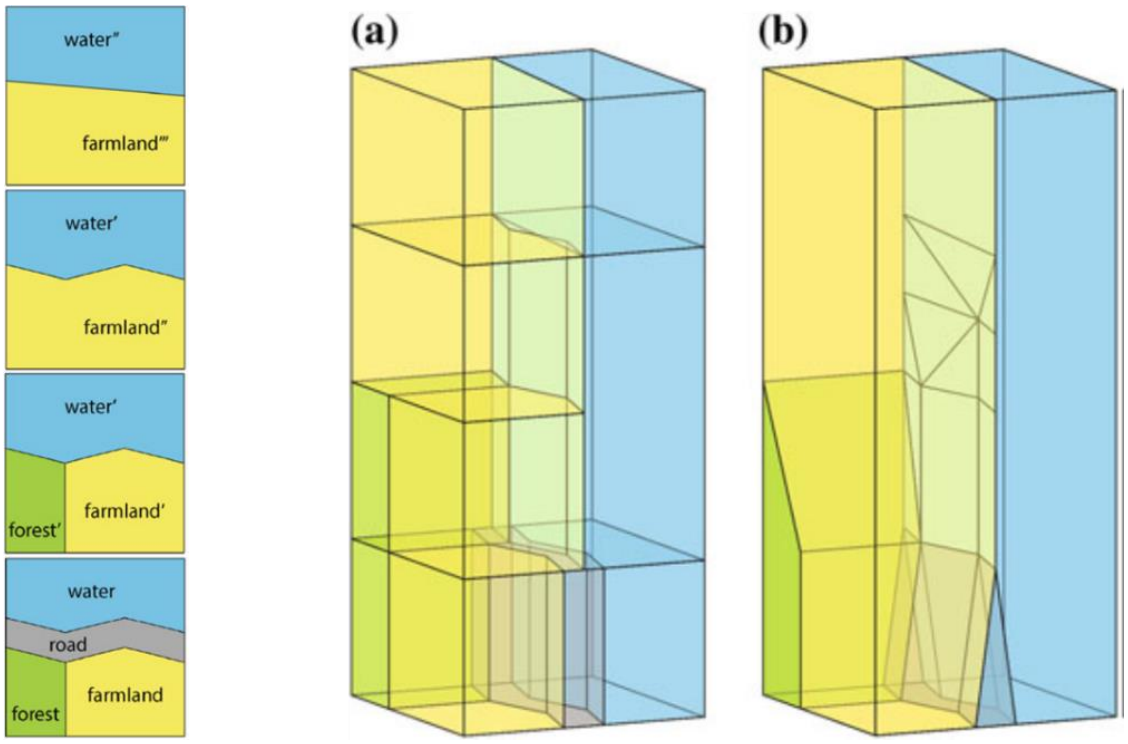


Figure 13. Illustration de la structure *Smooth Space Scale-Cube* (b), qui contrairement à une carte multi-échelle ici modélisée en (a), ne stocke que les transformations subies par les objets. *Source de l'image : [van Oosterom et al., 2014].*

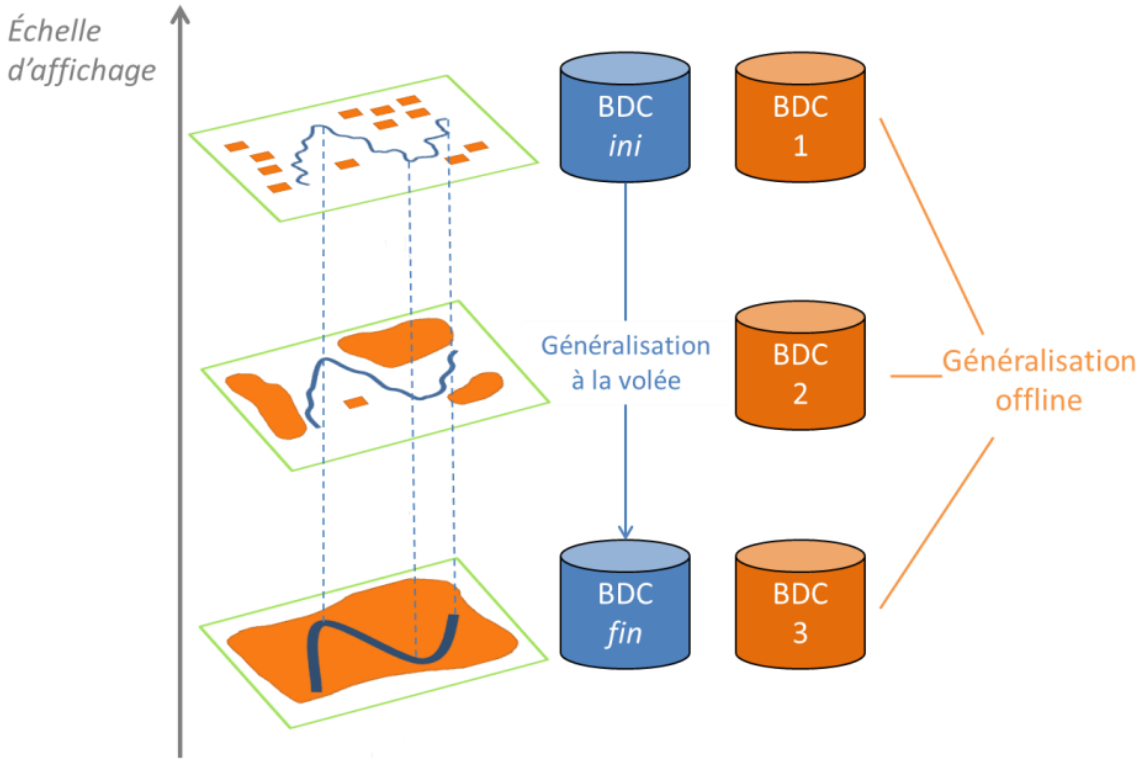


Figure 14. Illustration de la méthode proposée par [Cecconi et Galanda, 2002].

A.2.3. Généralisation Continue pour une Évolution plus Progressive

Le domaine de recherche en **généralisation continue** propose aussi des solutions intéressantes pour rendre l'évolution du contenu cartographique plus progressive au fil des échelles et atténuer les changements de représentation au fil des échelles, en créant une animation continue entre deux représentations existantes, composée d'une infinité d'états intermédiaires, entre lesquels la différence est assez minime pour ne pas être perçue.

Selon les opérateurs de généralisation utilisés, [van Kreveld 2001] liste plusieurs façons de créer cette **transition animée**, basée par exemple sur un mouvement, une rotation, un *morphing* (transformation de la forme de l'objet), une apparition ou une disparition, voire une combinaison de ces animations. Pour les opérateurs utilisant une fonction mathématique continue, comme le déplacement ou l'agrandissement d'un objet (cf. Figure 9), il est aisé de créer leur animation, et la transition ainsi créée semble visuellement logique. La littérature propose ainsi plusieurs méthodes pour généraliser les principaux types d'objets géographiques de manière continue [Sester et Brenner, 2005], dont le morphing de lignes [Nöllenburg et al., 2008], la sélection progressive dans un réseau routier [Chimani et al., 2014], ou la déformation continue de polygones [Danciger et al., 2009 ; Peng et al., 2016].

En revanche, pour des opérateurs de généralisation utilisant une transformation mathématique discontinue, les transitions de représentation que l'on peut obtenir sont moins évidentes. Par exemple, si l'on souhaite animer la **typification** d'un groupe de bâtiments (cf. Figure 9), c'est-à-dire le remplacement d'un groupe d'objets détaillés par un autre groupe d'objets moins nombreux et moins détaillés, [van Kreveld 2001] propose entre autres de créer une apparition des nouveaux objets simultanément à une disparition des anciens. Cela signifie que lors de l'animation, à un moment précis, on pourra voir simultanément tous les objets, anciens comme nouveaux. Si l'utilisateur choisit d'arrêter son opération de zoom à ce moment-là, la représentation cartographique n'aura géographiquement que peu de sens, ce qui n'est pas souhaitable.

Pour éviter cet écueil, [van Kreveld 2001] distingue deux types de représentations dans une carte multi-échelle, illustrées par la Figure 15 :

- les **cartes stationnaires** (en bleu), considérées comme des représentations cartographiques valides pour leurs échelles d'affichage,
- et les **cartes transitoires** (en vert), états intermédiaires obtenus par une transformation continue entre deux cartes stationnaires, permettant de créer une transition de représentation plus fluide.

Dans l'exemple en violet de la Figure 15, l'utilisateur réalise une opération de zoom avant (échelle d'affichage augmente) et s'arrête sur une carte transitoire à l'échelle symbolisée par le point violet. Une transformation de généralisation continue est alors appliquée pour revenir à la carte stationnaire précédente (qui est la plus proche), créant visuellement un « aller-retour » dans la simplification du contenu cartographique. Cette proposition permet donc d'assurer la validité de la représentation cartographique finalement affichée lorsque l'utilisateur arrête son opération de zoom, mais **implique parfois des transformations visuelles décorrélées d'un changement d'échelle, ce que nous estimons potentiellement perturbant pour l'utilisateur.**

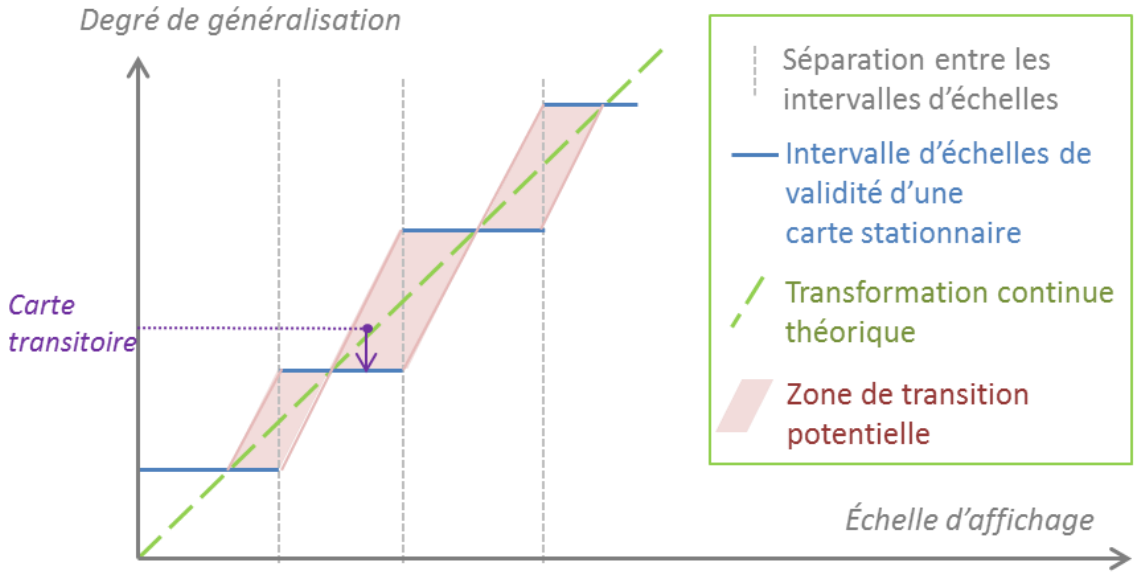


Figure 15. Utilisation des cartes stationnaires et transitoires selon [van Kreveld 2001], exemple en violet : l'opération de zoom s'arrête sur une carte transitoire (dans une zone rouge), une transformation est donc appliquée pour aller jusqu'à la carte stationnaire (en bleu) la plus proche en termes de généralisation, tout en restant à une échelle d'affichage constante.

Les méthodes de généralisation continue existantes permettent donc de créer une évolution plus progressive du contenu cartographique au fil des échelles. Cependant, à l'image des travaux de [van Oosterom et al., 2014] présentés dans le paragraphe précédent, elles intègrent mal les changements de niveaux d'abstraction ou transformations discontinues. Par ailleurs, comme nous l'avons évoqué précédemment, les transformations du contenu cartographique ne sont, ne peuvent et ne doivent pas toujours être continues. Nous pensons donc que ces méthodes sont une piste intéressante pour l'amélioration des cartes multi-échelles existantes, si et seulement si elles sont couplées à une approche de généralisation multi-niveaux, telle que présentée en §A.2.2.

Dans cette thèse, nous choisissons donc d'appliquer une approche de généralisation multi-niveaux inspirée du ScaleMaster, en **nous concentrant sur les problématiques d'évolution cohérente et progressive du contenu cartographique au fil des échelles.** Bien que reconnaissant le potentiel des méthodes de généralisation continue, nous choisissons **de ne pas les appliquer dans nos travaux**. Nous nous inspirerons toutefois de ces principes et gardons à l'esprit que ces méthodes peuvent être couplées ultérieurement à notre méthode multi-niveaux, pour améliorer la fluidité de navigation dans une carte multi-échelle.

A.2.4. Généralisation MR-aware pour une Évolution plus Cohérente

En parallèle de l'évolution progressive du contenu cartographique au fil des échelles, nous pensons que **sa cohérence** est essentielle à la fluidité de navigation dans une carte multi-échelle. Nous définissons ici la cohérence comme une **logique d'évolution de la représentation facile à comprendre et à suivre pour l'utilisateur**. En effet, des incohérences pourraient perturber l'utilisateur et rendre sa navigation plus difficile, par exemple un objet qui serait éliminé puis présent à nouveau à plus petite échelle, comme illustré par la Figure 16.

La généralisation continue propose des solutions intéressantes pour améliorer la **cohérence** du contenu au fil des échelles, puisqu'elle prend en compte les échelles connues (ou cartes

stationnaires) pour construire les échelles intermédiaires (ou cartes transitoires). Se basant également sur l'idée de prendre en compte les BDC existantes pour construire un contenu multi-échelle, la généralisation multi-niveaux propose de tendre vers un processus de généralisation « ***MR-aware*** » [Girres et Touya, 2014], ou **orientée multi-échelle**, qui connaitrait les différentes représentations existantes pour produire de nouvelles échelles [Girres et Touya, 2014]. Lors de la généralisation d'un objet ou d'un groupe d'objets entre deux échelles connues, le processus pourrait ainsi vérifier sa présence ou son niveau de détail à plus petite échelle, pour assurer la cohérence de sa représentation intermédiaire avec les représentations existantes, comme l'illustre la Figure 16. Ce principe a par exemple été appliqué en amont des travaux de [van Oosterom et al., 2014], pour assurer la cohérence du processus d'agrégation [Dilo et al., 2009]. Des travaux proposent également de prendre en compte les relations spatiales existantes entres les objets, aux échelles source et finale, pour assurer leur préservation lors de la généralisation de représentations intermédiaires [Bobzien et al., 2008].

Cette prise en compte des représentations existantes peut alors intervenir à trois étapes différentes du processus de généralisation [Girres et Touya, 2014] :

- **après** la généralisation, en détectant a posteriori les incohérences entre la représentation intermédiaire et la représentation moins détaillée existante, comme illustré par la Figure 16, ce qui est assez peu optimisé en termes de coût de production ;
- **avant** la généralisation, en écartant du processus les objets dont la représentation est restée identique à l'échelle moins détaillée existante, ou en modifiant les algorithmes existants pour qu'ils gardent ces objets comme invariants, pour pouvoir tout de même les prendre en compte comme éléments de contexte dans le traitement des autres objets ;
- **pendant** la généralisation, ce qui permet de ne traiter que les objets qui le nécessitent tout en prenant en compte la représentation moins détaillée existante, mais qui nécessite souvent une nouvelle implémentation des algorithmes existants.

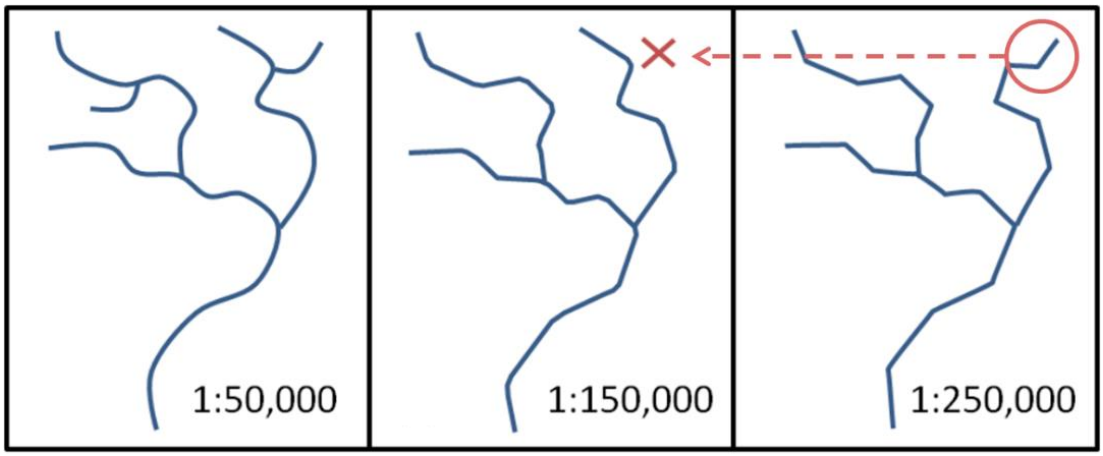


Figure 16. Illustration d'une incohérence potentielle dans une carte multi-échelle, ainsi que du concept de généralisation MR-aware [Girres et Touya, 2014] : pour généraliser les données à une échelle intermédiaire, on prend en compte la représentation moins détaillée existante.

Malgré le coût potentiel en terme de calculs, la meilleure solution si l'on souhaite réutiliser des algorithmes déjà implémentés, ce qui sera notre cas, semble donc de **détecter et corriger les incohérences potentielles après le processus de généralisation**. Ces méthodes permettant une évaluation de la cohérence seront à nouveau évoquées dans la partie §A.4.2. Par ailleurs, ces travaux

[Girres et Touya, 2014] partent du principe que les bases de données existantes sont cohérentes entre elles, ce qui n'est pas forcément le cas si elles ont été construites par deux processus de généralisation indépendants. Il pourrait donc parfois être nécessaire de **modifier les cartes existantes pour assurer la cohérence de la carte multi-échelle**.

Par ailleurs, la littérature propose des approches globales sur la plage d'échelles considérée. On peut notamment citer des méthodes de sélection de points, basées sur un **découpage progressif de l'espace en rectangles de taille variant selon l'échelle**, où les points sont éliminés de manière à ce que chaque rectangle ne contienne plus qu'une seule entité [Raposo et al., 2013]. On retrouve aussi l'idée de définir **des « cônes » simulant l'emprise des points sur la plage d'échelles considérée** [Schwartges et al., 2013], comme illustré par la Figure 17 : tronquer une partie des cônes en intersection permet alors d'éviter les conflits spatiaux. En plus de la cohérence de contenu, cette méthode tente aussi d'optimiser l'étendue de la plage d'échelles sur laquelle un point sera représenté. Par contre, elle ne considère pas la possibilité de déplacer les points pour les préserver à plus petite échelle. Les travaux de [Bereuter 2014] proposent de construire un **quadtree sur la répartition initiale des points** et d'appliquer des opérations de généralisation (sélection, simplification, agrégation, déplacement) sur la base de ce découpage spatial. Ces méthodes sont particulièrement adaptées à la généralisation temps-réel, pour visualiser des données utilisateurs dans des applications de mashups cartographiques. Cependant, elles nécessitent **de repenser entièrement la simplification du contenu cartographique sur la plage d'échelles considérée**, et ne permettent donc pas d'intégrer facilement les BDC existantes. Elles semblent donc peu indiquées pour l'amélioration de cartes multi-échelles existantes. Dans cette thèse, nous choisissons donc d'appliquer des méthodes de généralisation MR-aware **après le processus de généralisation**, en vérifiant a posteriori la cohérence des données généralisées avec les données moins détaillées existantes.

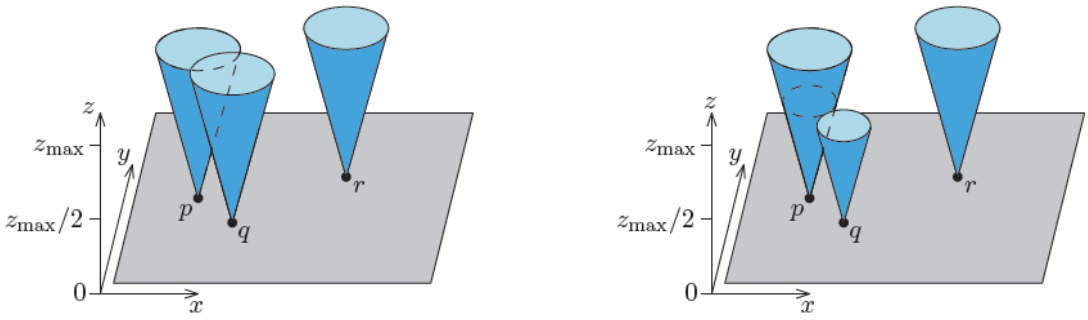


Figure 17. Illustration de la méthode de sélection de points introduite par [Schwartges et al., 2013] : les cônes représentent l'emprise des points sur la plage d'échelles considérée, une intersection signifiant un conflit spatial (à gauche), qui sera résolu en tronquant l'un des deux cônes (à droite).

A.2.5. Bases de Données Multi-Échelles et Liens entre Représentations

Pour assurer une cohérence du contenu cartographique au fil des échelles, il semble donc essentiel que les relations entre les différentes BDC soient connues. Pour cela, on peut construire une base de données multi-échelle (*multi-resolution database* ou **MRDB** en anglais), qui stocke les données des différentes BDC, mais aussi **les liens** entre les représentations d'un même objet géographique à différentes échelles [Kilpeläinen 2001 ; Vangenot et al., 2002]. Différentes stratégies existent pour construire une MRDB [Devogèle et al., 1998]. Si des BDC à différentes échelles existent déjà, une

première solution consiste à utiliser un processus d'appariement de données, qui retrouvent ces liens entre représentations en comparant par exemple des critères géométriques, topologiques et sémantiques [Olteanu-Raimond et al., 2015]. Sinon, on peut construire cette MRDB en stockant progressivement les liens pendant la généralisation des différentes échelles qui la composent. De nombreux producteurs institutionnels créent désormais une BDG détaillée à partir de laquelle ils dérivent plusieurs cartes ou BDC [Foerster et al., 2010] : il est donc possible d'appliquer la deuxième stratégie pour disposer des liens existants entre les différentes BDC.

Deux **stratégies de dérivation** différentes ont été identifiées par [Stoter 2005] et sont illustrées par la Figure 18. Avec une stratégie « en étoile » (*star* en anglais), les BDC à différentes échelles sont dérivées indépendamment par généralisation à partir d'une même BDG détaillée. Avec une stratégie « en échelle » cette fois (*ladder* en anglais), une première BDC est dérivée à partir d'une BDG détaillée, puis les BDC à plus petites échelles sont successivement dérivées à partir de la BDC précédente. Cette dernière approche nous semble théoriquement plus appropriée pour assurer la cohérence du contenu au fil des échelles. Néanmoins, une première comparaison des deux approches n'a montré aucune différence significative pour la production d'échelles intermédiaires [Buttenfield et al., 2011]. En pratique, les producteurs institutionnels utilisent souvent un mélange des deux approches, selon la plage d'échelles visée et le nombre de BDG existantes [Duchêne et al., 2014].

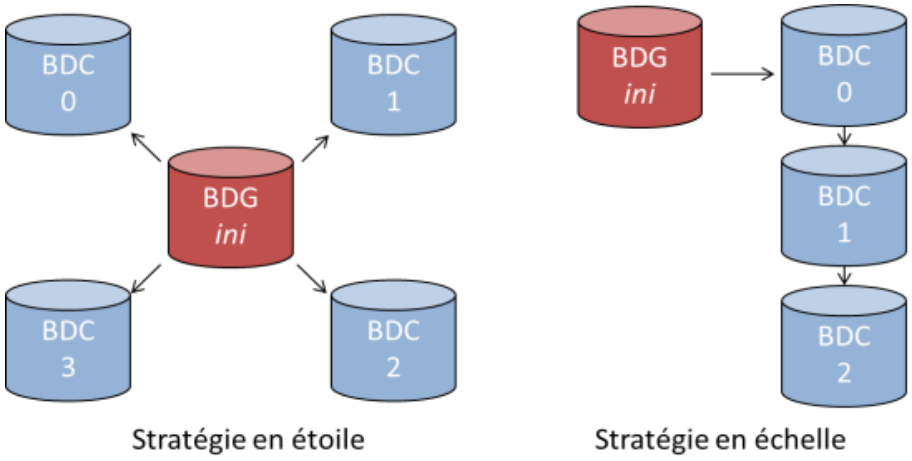


Figure 18. Stratégie en étoile (à gauche) et en échelle (à droite) pour la dérivation de BDC à différentes échelles à partir d'une BDG détaillée.

Les producteurs institutionnels adoptant cette structure multi-échelle sont particulièrement attirés par l'un de ses avantages : la **propagation automatique des mises à jour** [Mustière et van Smaalen, 2007]. En effet, si l'on modifie un objet de la BDG initiale et que l'on connait sa représentation à plus petite échelle grâce aux liens, on peut mettre à jour son correspondant seulement, sans avoir à dériver à nouveau entièrement la BDC impactée [Bobzien et al., 2005]. Des relations similaires peuvent également permettre de garder un historique des mises à jour en conservant les relations entre les différentes versions d'un même objet [Bobzien et al., 2008]. Cependant en pratique, peu de producteurs sont parvenus à implémenter cette mise à jour automatique, déplorant notamment le manque d'outils logiciels permettant de gérer ces relations [Duchêne et al., 2014]. A titre d'exemple, l'IGN ne dispose pas réellement de MRDB aujourd'hui. Néanmoins, la plupart des objets stockés dans les BDC produites conservent l'identifiant de leur antécédent dans la BDG initiale, permettant de retrouver partiellement les relations entre les objets des différentes BDC.

Pour permettre une **navigation fluide** dans une carte multi-échelle, une **combinaison** des approches existantes en généralisation multi-niveaux et généralisation continue semble la plus pertinente. Dans cette thèse, nous choisissons d'appliquer une approche de généralisation multi-niveaux, en nous concentrant sur les problématiques d'évolution du contenu cartographique au fil des échelles. Nous choisissons ainsi de ne pas utiliser des méthodes de généralisation continue, mais reconnaissons leur potentiel, notamment pour une utilisation ultérieure couplée à notre méthode. D'autre part, les méthodes de généralisation existantes apportent également des pistes intéressantes pour assurer une évolution de contenu **progressive** et **cohérente** au fil des échelles. Nous choisissons ici d'utiliser des méthodes de généralisation MR-aware, en vérifiant en aval du processus de généralisation la cohérence avec les représentations moins détaillées existantes.

Enfin, les structures de **bases de données multi-échelles existantes**, stockant les **relations** entre les représentations multiples d'un même objet à différentes échelles, permettent de structurer les données géographiques pour rendre possible l'application de ces approches. Les modèles et stratégies présentées ici sont aujourd'hui utilisées en production, bien que des verrous techniques subsistent. Les données de l'IGN que nous utiliserons dans cette thèse ne sont ainsi pas disponibles sous la forme d'une MRDB, mais il est possible de retrouver les relations multi-échelles à partir des informations disponibles. Les recherches en généralisation multi-échelle semblent donc **suffisamment mûres** pour fournir les outils et méthodes nécessaires pour atteindre les objectifs de cette thèse.

A.3. Visualisation de Cartes Multi-Échelles

En plus du contenu cartographique, **l'interface** utilisée pour visualiser une carte multi-échelle joue un rôle important dans la fluidité de navigation. Le domaine des interfaces homme-machine (IHM) a notamment proposé des méthodes pour améliorer la fluidité de navigation dans des représentations cartographiques hétérogènes, telles que des cartes à différentes échelles. Après avoir présenté un état de l'art de ces méthodes (§A.3.1), nous détaillerons la structure d'un géoportail, interface de visualisation standard des cartes multi-échelles (§A.3.2) ainsi que le format de celles-ci (§A.3.3). Enfin, nous détaillerons les différentes opérations de zoom utilisées pour naviguer dans ces cartes (§A.3.4).

A.3.1. Méthodes de Visualisation de Représentations Cartographiques Hétérogènes

Nous abordons dans ce paragraphe les méthodes existantes pour la visualisation de **représentations cartographiques hétérogènes**, « *non destinées à être utilisées conjointement* » [Hoarau 2015, p12], par exemple deux cartes à échelles différentes, ou bien une carte topographique et une image aérienne, dans une même interface de visualisation. Ces méthodes proposent des pistes intéressantes pour l'amélioration de la fluidité de navigation dans une carte multi-échelle. Nous distinguons deux types de méthodes différents : afficher les deux représentations l'une après l'autre, ou simultanément.

La première approche consiste à visualiser ces deux représentations hétérogènes en les affichant l'une après l'autre : la représentation actuelle disparait et la nouvelle représentation demandée s'affiche. C'est cette méthode qui est utilisée dans Google Maps par exemple, lorsque l'on choisit d'afficher la couche cartographique « Plan » puis la couche d'imagerie « Satellite ». Suivre visuellement un objet de l'une à l'autre peut être difficile à appréhender après cette **transition**

statique [Guilmaine 2011, p6], puisque le changement est brusque et que les différences entre les deux représentations peuvent être très importantes.

Pour faciliter la compréhension du passage d'une représentation à l'autre, la littérature en visualisation propose cette fois d'utiliser une **transition animée.** Cela permet à l'être humain d'appréhender les liens existants entre l'état initial et l'état final, qui sont parfois au-delà de ses compétences cognitives [Card 2008] et de mieux comprendre le processus qui permet de passer de l'un à l'autre [Clavien et Bétrancourt, 2003]. Les travaux dans ce domaine ont montré que les animations sont généralement préférées des utilisateurs et plus efficaces pour la réalisation de tâches de navigation et de comparaison de données [Robertson et al., 2002 ; Heer et Robertson, 2007 ; Shanmugasundaram et al., 2007], mais seulement si elles sont fluides et interactives [Gonzalez 1996]. Dans le cas contraire, si elles sont trop rapides ou présentent des incohérences logiques, elles peuvent nuire à la compréhension de l'utilisateur ou être moins efficaces [Tversky et al., 2002 ; Robertson et al., 2008]. On retrouve ici l'idée évoquée dans la partie précédente que des transformations continues peuvent induire des représentations non valides, qui doivent être évitées. Dans leurs travaux autour de la transition entre différents graphiques statistiques, [Heer et Robertson, 2007] préconisent ainsi le respect de la **congruence**, c'est-à-dire de la validité de la représentation tout au long de l'animation. A l'image de la Figure 19, ils conseillent dans ce cas de décomposer la transition globale en transitions plus élémentaires pour faciliter sa compréhension.

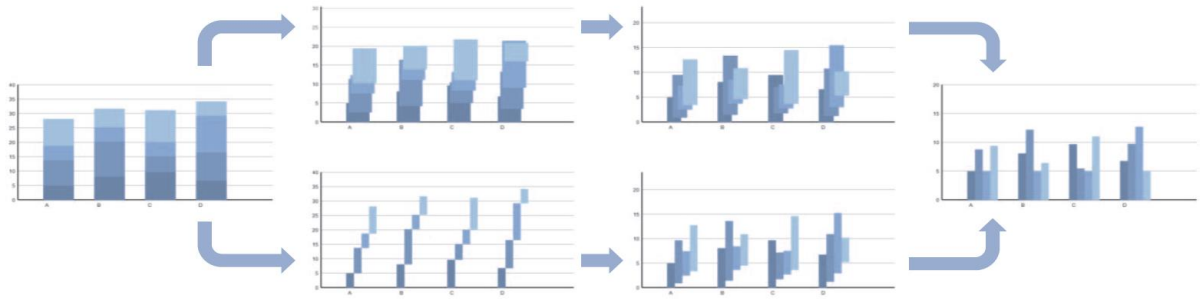


Figure 19. Pour passer d'un histogramme empilé à un histogramme classique et éviter des représentations non valides (transition en haut de l'image), [Heer et Robertson, 2007] proposent de décomposer la transition en deux étapes (en bas de l'image) : décalage des barres en abscisses puis descente verticale. *Source de l'image* : [Heer et Robertson, 2007].

Des travaux du domaine de la cartographie proposent des méthodes pour créer une série de **contenus intermédiaires valides**, voire de continuums de représentations valides, pour proposer ce type d'animation, par exemple entre une représentation abstraite et une représentation réaliste [Hoarau 2015] comme illustrés par la Figure 20 ; entre deux styles topographiques [Ory et Touya, 2017], entre deux échelles d'affichages par adaptation de la projection cartographique [Jenny 2012] ou bien entre deux niveaux de détail pour les modèles 3D urbains [Semmo et al., 2012].

La seconde approche consiste à **covisualiser** ces deux représentations, c'est-à-dire à les visualiser simultanément [Hoarau 2015, p35]. Il est par exemple possible d'afficher les deux contenus par superposition en jouant sur leur symbolisation et leur transparence, comme illustré par la Figure 21. Cette solution est toutefois assez limitée et le résultat de cette superposition n'est pas toujours lisible. Pour aller plus loin, des travaux proposent de modifier la symbolisation des données en adaptant les couleurs, les textures ou la forme et la taille des symboles pour assurer la lisibilité du résultat de la visualisation simultanée. Dans les travaux illustrés par la Figure 20, la couleur du

contour des routes est ainsi adaptée localement, en fonction du contexte géographique sous-jacent dans l'orthophotographie, afin d'assurer un contraste suffisant pour que le réseau routier soit lisible [Hoarau 2015, p111-121].

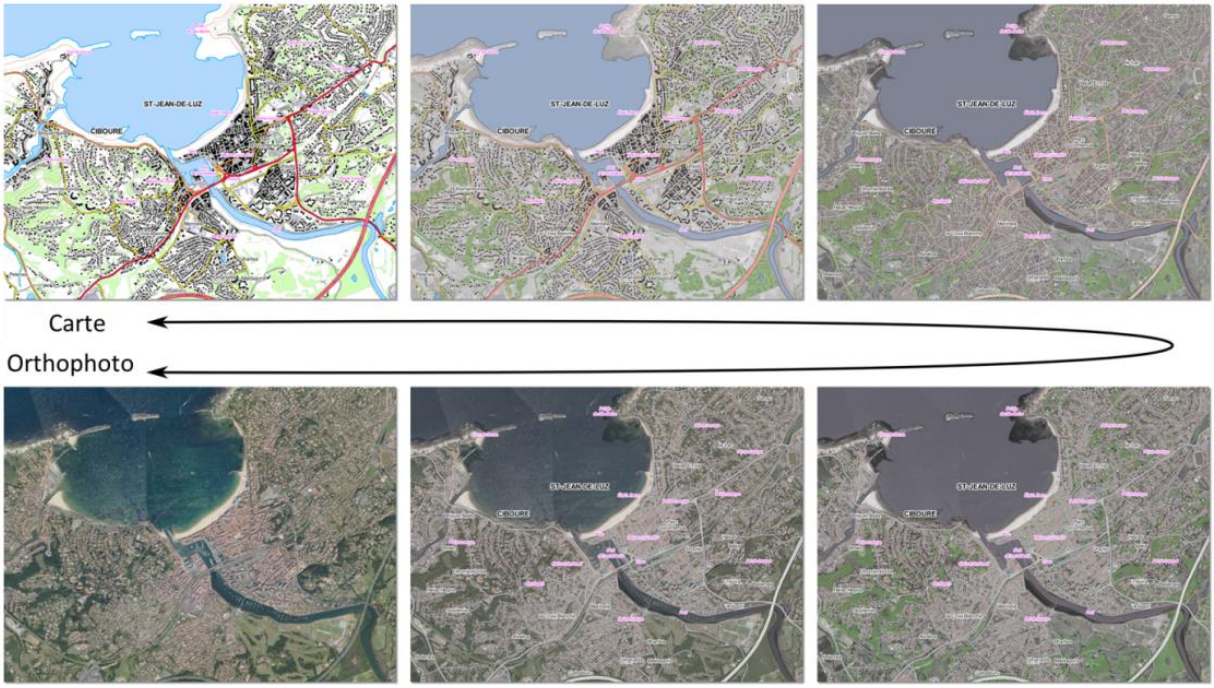


Figure 20. Continuum entre une représentation abstraite (carte à l'extrémité gauche en haut) et une représentation réaliste (image aérienne à l'extrémité gauche en bas) proposé par [Hoarau 2015].

Figure 21. Exemple de visualisation simultanée d'une carte (à gauche) et d'une image aérienne (à droite). Pour les représenter ensemble (au milieu), nous avons augmenté la transparence de la carte topographique.

Il est également possible d'afficher les deux représentations **simultanément**, mais dans deux parties différentes de l'interface. Un état de l'art des outils appliquant ce concept est disponible dans [Hoarau 2015, p35-42]. On peut notamment citer les barres de défilement, qui permettent de « glisser » d'une représentation à l'autre, ou la synchronisation de vues adjacentes, qui permet de voir les deux contenus l'un à côté de l'autre avec une navigation synchronisée. Ces concepts ont récemment été intégrés dans l'application « *Remonter le temps* »[1] de l'IGN, pour permettre la comparaison de données actuelles et historiques.

[1] https://remonterletemps.ign.fr

Une autre solution proposée consiste à utiliser une « **loupe** », outil de visualisation avec lequel on peut parcourir la représentation affichée et dans lequel est représenté un contenu différent. La Figure 22 présente un exemple de cet outil (à gauche), entre une carte topographique et une image aérienne. Ce type d'outil peut également être utilisé pour la visualisation de données à différents niveaux de détail, comme la Sigma Lens [Pietriga et al., 2008] qui réalise un grossissement de la zone observée, en appliquant une distorsion spatiale sur ses bords ; la Jelly Lens [Pindat et al., 2012] dont la forme s'adapte à l'objet observé ou la Route Lens qui permet quant à elle de suivre un itinéraire en étant attirée par lui et en grossissant son voisinage [Alvina et al., 2014], comme illustrée par la Figure 22 (à droite).

Bien que cette seconde approche soit généralement appréciée des utilisateurs et plus efficace pour la réalisation de tâches de comparaison [Lobo et al., 2015], elle est encore très peu utilisée pour la visualisation de données multi-échelles. On retrouve plus couramment des opérations de zoom par **transitions statiques** c'est-à-dire par remplacement brutal d'une échelle par une autre, ou bien par **transitions animées** pour certaines applications, ce qui permet des opérations de zoom plus fluides. Au sein du projet MapMuxing, dans lequel s'inscrit cette thèse, des chercheurs en géovisualisation et en interfaces homme-machine collaborent pour améliorer ces outils, en remplaçant par exemple la distorsion spatiale sur les bords par un continuum de représentations valides, comme précédemment évoqué. Dans notre thèse, nous choisissons cependant de **ne pas aborder ces pistes d'amélioration** et nous concentrerons uniquement sur le contenu cartographique des cartes multi-échelles, en utilisant **des interfaces standard de visualisation**, comme présentées dans le paragraphe suivant. Nous pensons donc que cette thèse ne s'inscrit pas à proprement parler dans le domaine de recherche en interface utilisateur (UI) bien que l'on puisse considérer que la carte reste un élément de l'interface, car nous ne considérerons pas les questions relatives à l'interface de visualisation et au mode d'interaction utilisé pour naviguer dans une carte multi-échelle.

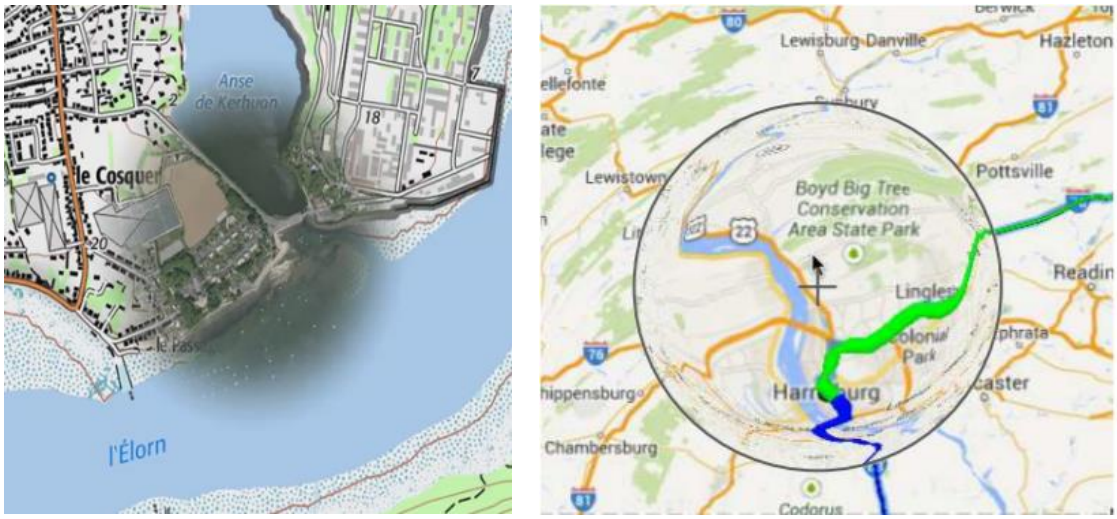


Figure 22. La loupe Sigma Lens (à gauche) comme outil de visualisation de deux représentations hétérogènes [Pietriga et al., 2008], comme une carte et une image aérienne ; ou bien comme outil de suivi d'un itinéraire ici illustrée par Route Lens (à droite) [Alvina et al., 2014].

A.3.2. Interfaces de Visualisation Standard des Cartes Multi-Échelles

Les interfaces de visualisation cartographique standard sont d'abord basées sur le concept d'interfaces zoomables (ZUI) [Perlin et Fox, 1993 ; Bederson et Hollan, 1994], qui permettent de

transformer la taille des objets visualisés selon leur « distance à l'utilisateur ». Plus l'utilisateur va zoomer, plus il va se rapprocher d'un objet, qui va devenir de plus en plus gros. Pour permettre une meilleure lisibilité du contenu cartographique au fil des échelles, on ne modifiera pas seulement la taille des objets, mais l'ensemble de leur représentation en utilisant plusieurs cartes à différentes échelles.

Comme nous l'avons évoqué en introduction, les cartes multi-échelles sont souvent diffusées via des applications cartographiques en ligne, appelées **géoportails**. Ces portails peuvent permettre la recherche, la consultation, la visualisation et l'analyse de données géographiques de sources et de natures variées. La mise en place de ces plateformes répond notamment à la directive européenne INSPIRE[1], qui prône la standardisation des infrastructures de données géographiques en Europe, pour assurer leur interopérabilité et faciliter leur diffusion. Pour accompagner cette directive, l'Open Geospatial Consortium (OGC) a mis en place un certain nombre de standards.

L'OGC a ainsi publié le **standard Web Map Service (WMS)** [OGC 2006], qui est un protocole de communication permettant d'interroger des serveurs de données géographiques au moyen de requêtes formatées, pour obtenir des représentations au format image de ces données. Ce protocole peut être utilisé directement depuis la barre d'adresse d'un navigateur web, en tapant la requête en URL, ou via une application cartographique en ligne reposant sur une architecture client-serveur comme illustrée par la Figure 23. Lorsque l'utilisateur effectue une opération de zoom par exemple, il demande l'affichage de nouvelles données. L'application cliente basée sur une API cartographique (OpenLayers, Leaflet, Google Maps) envoie alors une requête au serveur WMS (MapServer, GeoServer, ArcGIS Server, Qgis Server etc.), qui interroge un ou plusieurs serveurs de données cartographiques pour récupérer les données nécessaires. Le serveur WMS calcule ensuite une version image des données à la volée, puis renvoie le résultat à l'application cliente qui les affiche sur l'écran de l'utilisateur.

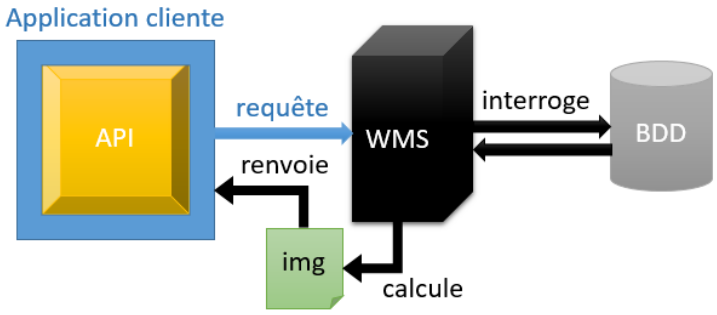


Figure 23. Illustration du fonctionnement d'une architecture client-serveur cartographique.

Le protocole WMS peut aussi bien diffuser des données sources image (raster) que vecteur, mais les fournit uniquement sous forme d'image, donc avec très peu d'interactions possibles avec les données elles-mêmes. Pour les données couramment utilisées, comme les cartes multi-échelles institutionnelles, on peut aussi pré-calculer une version tuilée de l'image produite par le serveur WMS, c'est-à-dire un découpage régulier de l'image en **tuiles**, dont on connait l'emprise géographique. Ainsi lors d'une requête, les tuiles correspondant à l'emprise demandée seront simplement chargées sans avoir besoin de les recalculer et l'affichage sera optimisé. Pour lire ce format, on utilisera cette fois le protocole **Web Map Tile Service (WMTS)** [OGC 2010].

[1] Directive 2007/2/CE du Parlement européen et du Conseil du 14 mars 2007

Contrairement aux protocoles WMS et WMTS, le **standard Web Feature Service (WFS)** [OGC 2014] permet l'affichage et la manipulation de données au format vecteur. Ce format présente de nombreux avantages, notamment un plus grand potentiel d'interaction avec les données [Gaffuri 2012]. Les recherches dans ce domaine sont assez mûres pour proposer des méthodes de tuilage efficaces, permettant l'utilisation du protocole WFS dans le géoportail institutionnel suisse [Ingensand et al., 2016]. Néanmoins, c'est le format WMTS qui prédomine encore aujourd'hui chez les producteurs cartographiques institutionnels et donc dans la structuration des cartes topographiques multi-échelles. Nous nous limiterons donc à ce format pour nos travaux et considérerons uniquement des flux cartographiques rastérisés.

A.3.3. Structure des Cartes Multi-Échelles

Pour définir une ressource cartographique au format WMTS, on définit un **maillage carré régulier** sur la zone géographique couverte, chaque maille ou tuile correspondant à une image calculée. Pour représenter cette zone à différentes échelles et donc à différents niveaux de zoom, on calculera ensuite des maillages de tailles différentes. La hiérarchie de ces maillages à différentes échelles suit un **quadtree**, c'est-à-dire qu'une maille à une échelle sera divisée en quatre sous-mailles à l'échelle immédiatement supérieure, et ainsi de suite. La Figure 24 illustre ce fonctionnement :

- pour chaque niveau de zoom (en vert), une échelle d'affichage est définie (en gris) (cf. Tableau 1 p.59) ;
- plus l'échelle diminue (zoom arrière), plus la portion de territoire affichée à l'écran est grande (dans le carré noir, sur les images de gauche comme de droite) ;
- la taille réelle de la carte complète représentant une même portion de territoire (en rouge) est donc de plus en plus petite ;
- la taille des objets cartographiques est aussi de plus en plus petite ;
- le contenu cartographique doit être de plus en plus généralisé pour rester lisible ;
- on utilise donc des cartes de moins en moins détaillées au fil des niveaux de zoom.

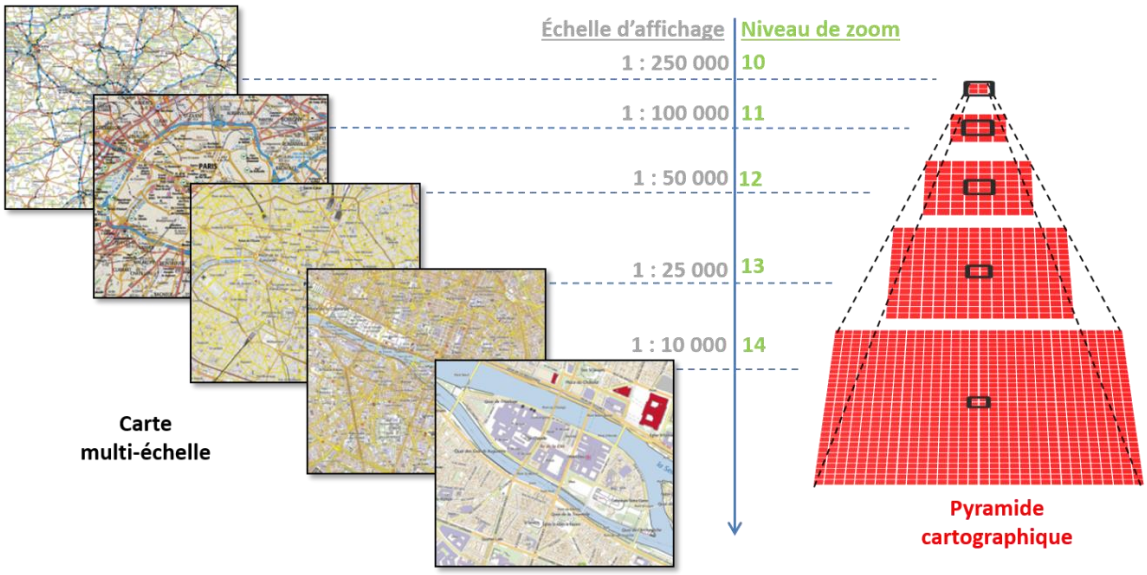


Figure 24. A gauche, contenu affiché à l'écran pour cinq niveaux de zoom de la carte multi-échelle Scan Express, produite par l'IGN. A droite, explication de sa structure pyramidale.

Une carte multi-échelle est donc structurée comme une pyramide, où chaque niveau correspond à une carte particulière. Pour clarifier notre propos dans le reste du mémoire, nous pourrons donc

aussi bien parler de **pyramide** pour désigner la carte multi-échelle, et de **niveau** pour faire référence à l'une des cartes la composant.

A.3.4. Interactions et Opérations de Zoom dans une Pyramide Multi-Échelle

Historiquement, les applications cartographiques proposaient des méthodes d'interactions basées sur les touches du clavier ou sur des outils de l'interface pour effectuer une opération de zoom. Différentes catégories d'outils existants sont illustrées par la Figure 25. Les outils de la **première catégorie** permettent de réaliser un zoom avant ou un zoom arrière, centré sur le centre de la fenêtre de visualisation. Concernant la **deuxième catégorie**, il faut sélectionner un outil puis l'utiliser localement sur la carte pour effectuer une opération de zoom centrée sur la souris. Les outils des **trois dernières catégories** sont des sliders, le long desquels l'utilisateur peut faire glisser le curseur, pour choisir le niveau de zoom à appliquer parmi une série limitée de paliers, représentés par des tirets et labellisés, ou non. Nous faisons ici plusieurs constats :

- les outils de type 1 et 2 ne représentent pas l'évolution de l'échelle, l'utilisateur ne peut donc pas savoir où en est la quantité de zoom appliquée ;
- les outils de type 3 la représentent, mais en utilisant des paliers également répartis ce qui ne reflète pas l'évolution mathématique réelle de l'échelle, dont les sauts sont de plus en plus grands lors d'une opération de zoom avant ;
- les outils de type 4 et 5 représentent également l'évolution de l'échelle mais sans paliers, donnant une fausse impression de continuité malgré l'utilisation de niveaux de zoom discrets.
- enfin, les outils 3 et 4 étiquettent ces paliers, par le dénominateur de l'échelle d'affichage, ou par un nom pour leur donner un sens sémantique, similaire aux ordres de grandeurs d'Yves Lacoste.

Quel que soit l'outil utilisé, l'appréciation du saut d'échelles effectué par l'utilisateur n'est donc pas très intuitive. Il peut donc être difficile de comprendre les transformations du contenu cartographique. De plus, ces outils présentent peu d'efficacité, puisqu'ils monopolisent l'attention visuelle de l'utilisateur et nécessitent une interaction (clic souris par exemple) généralement en périphérie ou en dehors de la carte.

Figure 25. Différents types d'outils de zoom existants. Captures respectivement issues des géoportails de Swisstopo, de l'ICGC Catalogne, de l'OS Irlande, de l'IGN (ancienne version) et de l'ICGC Catalogne également.

Les avancées en matière d'IHM ont permis de rendre la navigation multi-échelle beaucoup plus

efficace et intuitive, en utilisant la molette de la souris ou des interactions tactiles sur les écrans qui le supportent. Néanmoins, ces interfaces intègrent toujours un des outils ici présentés.

Par ailleurs, le standard WMTS fixe une évolution de l'échelle d'affichage ainsi qu'une structure basée sur 21 niveaux de zoom, décrites par le Tableau 1. On constate bien ici que l'évolution de l'échelle d'affichage aux différents niveaux de zoom n'est pas linéaire : plus l'échelle augmente, plus le saut d'échelles entre deux niveaux de zoom consécutifs est grand. D'une part, cela risque de perturber l'utilisateur car un saut d'échelles important implique souvent un changement radical du contenu cartographique comme nous l'avons précédemment expliqué. D'autre part, l'utilisateur peut parfois avoir besoin d'arrêter son opération de zoom à une autre échelle d'affichage, où l'emprise géographique correspond mieux à son besoin.

Niveau	Échelle	Niveau	Échelle	Niveau	Échelle
0	1 : 500 000 000	7	1 : 2 500 000	14	1 : 10 000
1	1 : 250 000 000	8	1 : 1 000 000	15	1 : 5 000
2	1 : 100 000 000	9	1 : 500 000	16	1 : 2 500
3	1 : 50 000 000	10	1 : 250 000	17	1 : 1 000
4	1 : 25 000 000	11	1 : 100 000	18	1 : 500
5	1 : 10 000 000	12	1 : 50 000	19	1 : 250
6	1 : 5 000 000	13	1 : 25 000	20	1 : 100

Tableau 1. Niveaux de zoom et échelles d'affichage définies par le standard WMTS [OGC 2010].

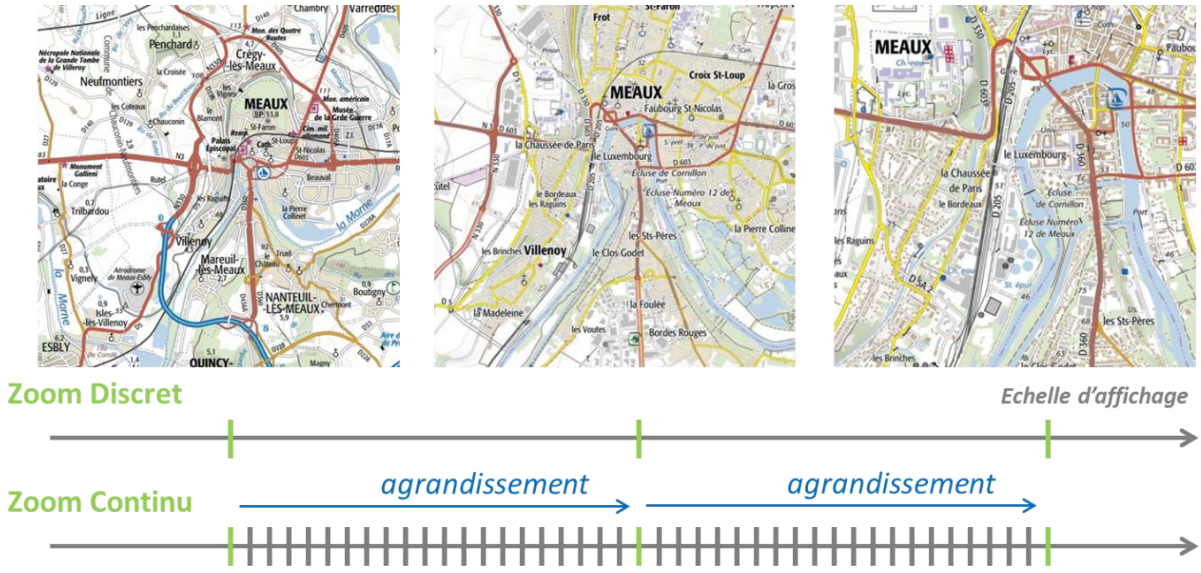


Figure 26. Comparaison entre un système de zoom discret et un système de zoom continu, dans lequel l'utilisateur peut s'arrêter à n'importe quelle échelle, le système réalisant un agrandissement « photo » de la représentation précédente, jusqu'à atteindre la prochaine représentation disponible.

Pour proposer plus d'échelles et une navigation plus fluide, les chercheurs en IHM ont proposé d'améliorer ces opérations de zoom classique. Plutôt que de permettre uniquement à l'utilisateur d'arrêter son opération de zoom sur les niveaux standards, séparés par un saut d'échelles important, ils proposent un concept de zoom continu ou « ***smooth zooming*** » [van Wijk et Nuij, 2003], où l'utilisateur pourrait s'arrêter à l'échelle de son choix. De nombreux géoportails proposent

aujourd'hui cette technologie, notamment les plus communément utilisés comme Google Maps, OpenStreetMap mais aussi certains producteurs institutionnels, dont l'IGN ou Swisstopo. Il est difficile d'appréhender ce concept d'animation visuelle par un schéma, mais nous avons tenté d'en expliquer le principe dans la Figure 26.

En pratique, la structure des cartes multi-échelles décrite dans le paragraphe précédent peut toujours être utilisée. Pour représenter les données sur une plage d'échelles entre deux représentations cartographiques connues et donc créer des cartes transitoires, le système de zoom continu réalisera un **agrandissement « photo »** de la représentation stationnaire précédente, jusqu'à atteindre la représentation stationnaire disponible suivante, et ainsi de suite.

Dans cette thèse, nous considérons uniquement les méthodes de visualisation standard, habituellement utilisées dans les **géoportails**. Les méthodes que nous développerons devront donc être adaptées au standard WMTS, pour que les interfaces existantes puissent facilement les intégrer. Les récentes avancées technologiques en matière de zoom permettent désormais de proposer un zoom continu, en réalisant un agrandissement photo entre les représentations existantes. Néanmoins, si les changements d'une représentation existante à l'autre sont trop importants, l'utilisateur pourra encore avoir des difficultés à appréhender le passage de l'une à l'autre. Les interfaces existantes semblent donc aujourd'hui suffisantes pour fournir une navigation multi-échelle fluide, si et seulement si les **transitions de représentation** le sont aussi, ce qui n'est pas encore le cas.

A.4. Évaluation de Cartes Multi-Échelles

Après avoir présenté les outils et méthodes existants pour la conception et la visualisation de cartes multi-échelles, nous abordons dans cette partie leur **évaluation**. Dans ce travail de thèse, nous avons pour objectif de proposer des méthodes pour améliorer la fluidité de navigation dans les cartes multi-échelles existantes. Pour apprécier l'amélioration apportée par nos propositions, il nous faudra être capable d'évaluer ces cartes et cette navigation. Dans les paragraphes suivants, nous présentons donc les méthodes existantes permettant d'évaluer le processus de généralisation (§A.4.1), ainsi que la progressivité et la cohérence de l'évolution de contenu au fil des échelles que nous pensons essentielles (§A.4.2). Enfin, nous aborderons les tests utilisateurs (§A.4.3).

A.4.1. Évaluation du Processus de Généralisation Cartographique

Pour évaluer la qualité d'une pyramide multi-échelle, il semble évident qu'il est nécessaire d'évaluer la qualité des différentes cartes qui la composent. Nous parlons ici de **qualité** pour désigner l'écart entre la carte et ses spécifications, ainsi que l'adéquation de ses spécifications aux besoins utilisateurs [David et Fasquel, 1997]. Comme nous l'avons expliqué dans les parties précédentes, ces cartes sont individuellement obtenues par un processus de généralisation. La qualité d'un processus de généralisation sera évaluée comme la satisfaction de ses **contraintes** [Ruas 1999 ; Stoter et al., 2009]. Un état de l'art des méthodes d'évaluation de la généralisation peut notamment être trouvé dans [Bard 2004 ; Stoter et al., 2014b].

Traditionnellement, les cartographes évaluent **visuellement** le résultat de leur processus en se basant sur leur expertise et éventuellement sur la comparaison avec d'autres produits existants. En plus de fournir une évaluation globale, cette méthode repose aussi sur un ensemble de points de

contrôle locaux, comme la position des toponymes ou la taille des ponctuels par exemple [Bard 2004, p39]. Bien qu'elle soit non exhaustive et assez subjective car liée à l'appréciation et à l'expertise du cartographe [Spiess 1995 ; Weibel et Dutton, 1999], cette méthode apporte une première indication de la qualité de la généralisation. Avec l'automatisation de la généralisation, des méthodes d'évaluation automatiques sont également apparues plus récemment [Bard 2004], mais on utilise toujours aujourd'hui cette expertise dans la définition des contraintes.

On distingue alors deux types de contraintes : les contraintes de **lisibilité** et les contraintes de **préservation/changement** [Bard 2004, p55]. La première catégorie impose le respect des seuils de lisibilité et de perception [Cuenin 1972, p164-166] que nous avons déjà évoqués au §A.1.2. Elle considère également les contraintes de complexité de l'information, qui doit être suffisante pour correspondre aux besoins des utilisateurs, mais maitrisée pour ne pas dépasser leurs capacités d'analyse. Cette complexité tient compte de la quantité d'information, de la distribution spatiale de l'information, de la complexité graphique des objets représentés et de la résolution graphique du rendu [Stoter et al., 2014b p.274]. Des chercheurs ont récemment proposé d'utiliser des mesures basées images appelées « ***mesures de clutter*** » pour évaluer la généralisation [Touya et al., 2015 ; Touya et al., 2016 ; Brychtova et al., 2016]. Ces mesures permettent d'estimer la quantité d'information du contenu cartographique et la complexité de son organisation [Rosenholtz et al., 2007 ; Bravo et Farid, 2008 ; Jégou et Deblonde, 2012]. Elles peuvent donc donner une indication sur la complexité de la carte, sans toutefois prendre en compte ni la complexité de la symbolisation ou de la sémantique [MacEachren 1982 ; Fairbairn 2006 ; Jégou et Deblonde, 2012], ni les conflits spatiaux, indétectables par des mesures basées image [Touya et al., 2015]. Des méthodes complémentaires ont donc été proposées, cette fois basées sur des mesures réalisées directement sur les données [Stigmar et Harrie, 2011 ; Harrie et al., 2015].

La seconde catégorie de contraintes a pour but de limiter les **changements** imposés par le respect des contraintes de lisibilité, pour **préserver** les caractéristiques principales de l'information initiale, par exemple les structures hiérarchiques du réseau routier, les alignements de bâtiments, etc. Pour quantifier et qualifier les effets de la généralisation, il est nécessaire d'avoir une **référence** à laquelle comparer le résultat de la généralisation, par exemple les données initiales [João 1995 ; Bard 2004]. Ces contraintes ont pour mission de préserver les similitudes et les différences entre les différents objets de la carte, mais aussi de maintenir l'organisation de l'espace : la répartition des densités, les motifs spatiaux et les relations topologiques [Regnauld 2002]. Ces contraintes peuvent donc aussi bien porter sur des critères géométriques, sémantiques ou bien topologiques et peuvent dépendre des types d'entités géographiques et de géométrie évalués. On peut par exemple quantifier globalement le nombre d'objets éliminés [Töpfer et Pillewizer, 1966], les changements de forme d'une ligne [Plazanet 1996, p171-180] ou bien la répartition et la densité des bâtiments [Regnauld 1998, p137-142]. Pour cela, il faut évidemment connaitre les **relations** entre les objets de la carte et leurs antécédents dans les données initiales, mais aussi avoir **enrichi** ces dernières au préalable, pour connaitre les relations spatiales initiales par exemple. Il apparait rapidement que quantifier ces transformations peut être très difficile lorsque ces relations sont **multiples**, c'est-à-dire lorsqu'un objet de la carte représente plusieurs objets initiaux, par exemple lors d'une opération d'agrégation. Par ailleurs, lors d'un changement de **niveau de détail**, on utilisera des contraintes différentes en fonction du niveau d'analyse [Ruas 2004]. Les travaux de Xiang Zhang proposent par exemple des méthodes pour évaluer la préservation des alignements de bâtiments à différentes échelles [Zhiang et al., 2013].

D'autre part, pour chacune de ces contraintes, il faut définir des **valeurs de seuil** à respecter. Selon le type de contraintes utilisé, Sylvain Bard propose des **fonctions d'évolution** attendue de ces valeurs, pour une échelle cible donnée [Bard 2004], dont le principe est illustré par la Figure 27 a. Ces fonctions permettent ensuite d'évaluer la valeur observée, en la comparant à la valeur finale théorique et en admettant une certaine **tolérance**, comme illustré par la Figure 27 b. Il n'y a cependant pas de consensus sur le paramétrage de ces fonctions, d'une part parce qu'elles sont très dépendantes des données, de l'échelle, du contexte géographique et du but de la carte ; mais aussi parce qu'elles découlent d'une expertise propre à chaque producteur. Elles sont donc généralement établies par une **approche empirique**, par un cycle d'essais-erreurs par exemple. Certains travaux de recherche ont néanmoins proposé des méthodes couramment utilisées pour définir ces valeurs dans des cas précis. On peut notamment citer la « ***radical law*** » qui propose de calculer le nombre d'objets à conserver après un processus de sélection, en fonction du nombre d'objets initial, du saut d'échelles et de facteurs de symbolisation [Töpfer et Pillewizer, 1966], ou les travaux de [Foerster et al., 2007] qui propose un ratio applicable pour des algorithmes de simplification.

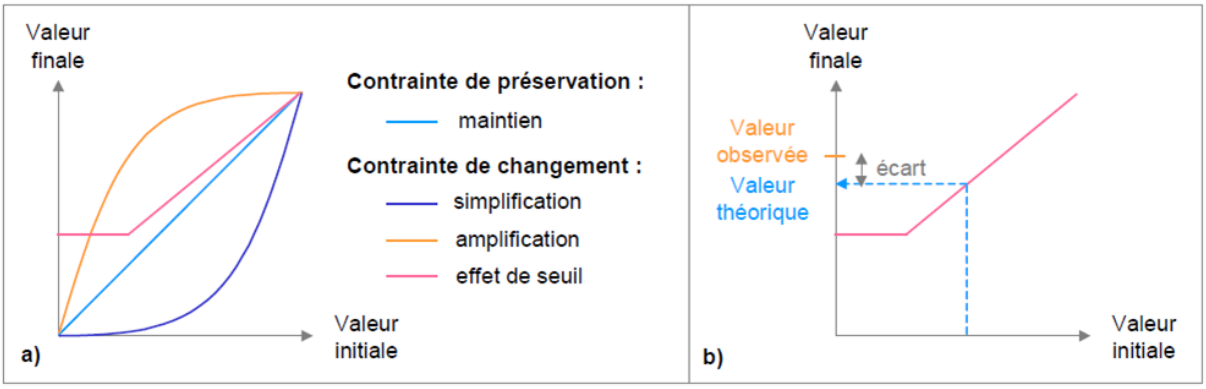


Figure 27. Illustration des fonctions d'évolution des valeurs de seuil proposées par [Bard 2004].

Enfin, pour donner une évaluation globale de la qualité de la généralisation, il faut encore établir une fonction d'agrégation de ces différents indicateurs, qui sont souvent définis par des unités et des plages de valeurs différentes [Ehrliholzer 1995 ; Bard 2004]. D'autre part, toutes ces contraintes n'ont pas forcément la même importance pour la qualité de la carte. Il est donc parfois nécessaire de **prioriser leur satisfaction** et de définir des critères de violation acceptable [Harrie 2001], pour que la représentation globale soit considérée satisfaisante malgré le non-respect de certaines contraintes [Touya 2012].

Des méthodes d'évaluation existent pour qualifier un processus de généralisation : on est donc théoriquement capable d'estimer au moins partiellement la qualité de chacune des cartes composant une pyramide multi-échelle, de manière automatique. Cependant, les contraintes sur lesquelles se basent ces méthodes d'évaluation restent **complexes à définir**, car elles varient en fonction du cas d'application. Elles sont souvent obtenues par une approche empirique très coûteuse ou par l'expertise du producteur. Dans cette thèse, nous estimerons donc principalement la qualité de nos processus de généralisation par un **contrôle visuel du résultat**, mais appliquerons d'autres méthodes pour évaluer les cartes multi-échelles existantes, comme des mesures de clutter. Par ailleurs, il ne suffit certainement pas d'une suite de cartes bien généralisées pour faire une bonne pyramide multi-échelle. Nous pensons que **leur contenu doit également être cohérent et évoluer progressivement au fil des échelles**.

A.4.2. Évaluation de l'Évolution du Contenu au Fil des Échelles

Comme discuté précédemment, les processus de généralisation utilisés pour produire les différents niveaux d'une pyramide multi-échelle impliquent parfois **d'importants changements** du contenu cartographique au fil des échelles. Nous pensons qu'avoir une évolution **cohérente** et **progressive** du contenu cartographique au fil des échelles peut améliorer la fluidité de navigation dans une pyramide multi-échelle. Nous évoquons dans ce paragraphe les méthodes existantes permettant d'évaluer cette évolution.

Dans le paragraphe précédent, nous avons évoqué les contraintes de préservation qui assurent la **cohérence** de chacun des niveaux qui composent la pyramide, avec les données initiales. En plus de cette cohérence individuelle, nous pensons que les différents niveaux d'une pyramide multi-échelle doivent être **cohérents entre eux**, c'est-à-dire qu'une transformation appliquée à un niveau ne devra pas être inversée dans l'un des niveaux moins détaillés. Par exemple, si un objet est éliminé, il ne doit pas réapparaitre à plus petite échelle. De telles incohérences peuvent apparaitre dans le cas où les différents niveaux ont été généralisés par un processus ne prenant pas en compte les représentations moins détaillées existantes (cf. §A.2.4), dans le cas d'une généralisation en étoile par exemple (cf. §A.2.5). Pour détecter des incohérences au sein d'une pyramide multi-échelle, il est donc nécessaire de connaitre les relations entre ses différents niveaux, que l'on peut construire par un processus d'appariement. Cependant, des relations multiples (1-n ou n-m) peuvent exister entre les entités, voire entre les classes d'entités, si les deux cartes à apparier utilisent des niveaux de détail différents [Bard et Ruas, 2004 ; Mackaness et Ruas, 2007]. Dans le cas des réseaux routiers notamment, des processus d'**appariement multi-échelle** ont été spécifiquement développés [Zhang et al., 2005 ; Mustière et Devogèle, 2008]. Un état de l'art des processus adaptés à d'autres données peut être trouvé dans [Sheeren 2005], qui propose quant à lui des méthodes pour apparier des bases de données géographiques multi-échelles. **Il est donc théoriquement possible aujourd'hui de reconstruire les relations entre les niveaux existants, même lorsque ceux-ci ne sont pas explicites**.

Pour évaluer la **progressivité** de l'évolution du contenu cartographique cette fois, on peut utiliser la quantification des effets de la généralisation, évoquée dans la partie précédente. En comparant les valeurs des mesures d'évaluation de la généralisation à différentes échelles, on peut estimer la **variation** des différentes contraintes sur la plage d'échelle globale. Par exemple, des mesures d'entropie [Bjorke 2003 ; Li et Huang, 2002] peuvent être utilisées pour estimer la variation de la quantité d'information. Des travaux ont aussi comparé des mesures de clutter pour estimer la variation de la complexité visuelle du contenu cartographique à différentes échelles [Touya et al., 2015 ; Brychtova et al., 2016]. Des mesures de **similarité** peuvent également être utilisées pour estimer la **différence** entre deux niveaux de zoom consécutifs de la pyramide [Yan et al., 2016]. L'ensemble de ces mesures donne une estimation du « ***degré de généralisation*** » [Zhou et Jones, 2003 ; Zhou 2014], que l'on peut définir comme la force de généralisation utilisée pour simplifier le contenu cartographique. Tout en respectant les contraintes de lisibilité communément admises, il est en effet possible d'utiliser un degré de généralisation différent à même échelle en fonction des besoins utilisateurs [Gould 2012 ; Zhou 2014], comme illustré par la Figure 28, en jouant ici sur la simplification de la géométrie mais aussi sur la taille du symbole. Nous pensons que l'évolution du degré de généralisation au fil des échelles peut aussi être un levier d'amélioration potentielle d'une carte multi-échelle.

Les mesures de qualité de la généralisation peuvent donc nous aider à évaluer la variation de

contenu cartographique au fil des échelles, et donc à détecter une difficulté potentielle pour la navigation de l'utilisateur. Nous appliquerons notamment ces principes pour estimer les variations de complexité dans les cartes multi-échelles existantes, en comparant les mesures de clutter au fil des échelles. Cependant, la plupart de ces mesures ne considèrent que la complexité visuelle ou graphique, sans prendre en compte la complexité d'interprétation et d'analyse qui intervient également dans ce **processus cognitif complexe** qu'est la navigation cartographique [MacEachren 1982 ; Fairbairn 2006 ; Jégou et Deblonde, 2012 ; Purchase et al., 2012]. Pour évaluer cet aspect cognitif, la littérature propose d'utiliser des tests utilisateurs.

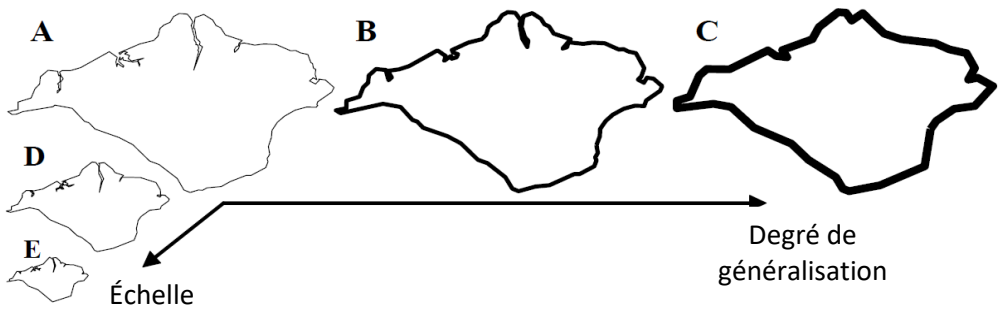


Figure 28. A une même échelle, on peut utiliser un degré de généralisation différent (A, B, C), représentant la "force de simplification" du processus de généralisation.

A.4.3. Tests Utilisateurs

Bien que de plus en plus courante, l'utilisation de **tests utilisateurs**, c'est-à-dire d'évaluations empiriques impliquant la participation d'utilisateurs est assez récente en cartographie [Davies et al., 2010] et est plutôt habituelle des domaines de recherche en sciences physiques, en sciences cognitives et en IHM [Roth et al., 2017]. Ces expériences permettent d'évaluer le potentiel d'un produit informatique ou de comprendre un phénomène physique, en mesurant et en comparant les actions réalisées par plusieurs participants dans différentes conditions.

Appliquées au domaine de la géovisualisation, elles sont particulièrement utiles pour comprendre les **processus cognitifs** impliqués dans la navigation dans l'espace ou l'utilisation d'une carte. Elles peuvent aussi être utilisées pour évaluer **l'efficacité de représentations cartographiques** [Boér et al., 2013 ; Brychtova et al., 2016], d'outils ou d'interfaces de visualisation [Cöltekin et al., 2009 ; Jakobsen et Hornbaek, 2011] ou de méthodes d'interaction [Pindat et al., 2012 ; Lobo et al., 2015] pour une tâche donnée. Ce type d'évaluation peut également être utilisé pour montrer la pertinence de mesures de complexité graphique en vérifiant leur cohérence avec le comportement des utilisateurs [Phillips et Noyes, 1982 ; Rosenholtz et al., 2007 ; Stigmar et Harrie, 2011]. D'une manière plus empirique, elles peuvent aussi montrer l'influence d'une variable graphique, la couleur ou le style par exemple, sur le comportement de l'utilisateur [Fabrikant et al., 2012 ; Brychtova et Cöltekin, 2014].

Pour évaluer la qualité relative des produits testés, on mesure les variations du **comportement** de l'utilisateur en fonction du produit utilisé, lors de la réalisation d'une tâche. Il est ici essentiel d'identifier les différentes variables qui entrent en jeu dans l'expérience et qui sont susceptibles d'influencer le comportement de l'utilisateur. Pour isoler l'influence des variables que l'on souhaite étudier, on cherche alors à fixer dans la mesure du possible les autres variables, qui ne nous

intéressent pas. Pour mener ces tests utilisateurs, la littérature conseille donc de réaliser des **tests contrôlés**, dans lesquels on essaye de maitriser un maximum de variables [Griffin et al., 2006 ; Martin 2008]. Plutôt qu'un test en ligne, on réalise alors une expérience en laboratoire, dans les mêmes conditions d'environnement (luminosité, sonorité, taille et résolution d'écran), pour que ces variables n'influencent pas le comportement de l'utilisateur au cours du test. Cependant, **il n'est jamais possible de maitriser tous les facteurs** et ce n'est pas toujours souhaitable car plus ils sont fixés, moins les résultats de l'expérience sont généralisables [Martin 2008]. Il est donc relativement courant que les résultats de l'expérience ne soient pas significatifs [Fabrikant et al., 2008] et que l'on ne comprenne ses erreurs que pendant ou après l'expérience [Griffin et al., 2006 ; Saint-Marc et al., 2017]. **Dans cette thèse, nous utiliserons ainsi un test utilisateurs contrôlé pour évaluer l'influence des différentes caractéristiques du contenu cartographique sur la fluidité de la navigation et valider nos hypothèses d'amélioration des cartes multi-échelles existantes.**

Pour mettre en place notre test utilisateurs, il nous faudra définir **la tâche** que nous demanderons aux utilisateurs de réaliser, **le plan d'expérience**, c'est-à-dire les conditions testées pour chaque essai et l'ordre dans lequel elles sont présentées, le **panel de participants** impliqués et enfin **l'implémentation en pratique** du test. Ces choix sont présentés dans le Chapitre E. Pour cela, nous nous appuierons sur la collaboration avec les chercheurs en IHM de l'équipe ILDA, établie au sein du projet MapMuxing, qui sont coutumiers de cet exercice.

Nous nous inspirerons de la littérature en **cartographie, sciences cognitives et IHM**. Nous montrerons qu'il n'existe pas à notre connaissance de test utilisateurs visant à évaluer la fluidité de navigation dans une carte multi-échelle. De plus, [Roth et al., 2017] dénote que la description des travaux existants dans la littérature manque généralement de détail pour permettre leur reproduction et leur adaptation à d'autres cas d'études. Se confrontant aux écueils de la mise en place d'un protocole de test contrôlé et faisant face à des biais non attendus, [Saint-Marc et al., 2017] expose la difficulté de définir une tâche et un protocole de test sans s'appuyer sur des protocoles déjà éprouvés. Ces deux travaux appuient la nécessité d'un élan communautaire pour proposer des lignes directrices et protocoles détaillés qui fonctionnent en géovisualisation. **Sans pouvoir nous appuyer sur un protocole existant, la mise en place de notre expérience sera donc guidée par une démarche empirique, dont nous chercherons à tirer des leçons sur la bonne conduite de tests utilisateurs contrôlés en géovisualisation.**

Pour avoir une première indication sur la **qualité** des cartes multi-échelles existantes, nous pourrons donc appliquer dans un premier temps des méthodes d'évaluation de la généralisation aux différents niveaux de la pyramide, comme des mesures de clutter. Observer la **variation** de ces mesures au fil des échelles nous permettra en plus d'apprécier l'évolution du contenu cartographique et la **complexité des transitions** de représentation entre les différents niveaux. En revanche, pour évaluer les processus de généralisation que nous utiliserons pour mettre en application nos hypothèses d'amélioration, il nous semble plus pertinent de privilégier un **contrôle visuel** du résultat pour respecter les limites de temps et de ressources de notre mise en application. Enfin, comme ces mesures ne couvrent qu'une partie de la difficulté cognitive liée à la navigation cartographique, nous réaliserons également un **test utilisateurs contrôlé**, pour évaluer l'influence des différentes caractéristiques du contenu cartographique sur la fluidité de la navigation de l'utilisateur, mais aussi pour évaluer l'amélioration apportée par nos méthodes.

A.5. Reformulation des Objectifs et Contributions Attendues

A.5.1. Reformulation des Objectifs, Positionnement et Périmètre de Nos Travaux

Comme nous l'avons mentionné dans cet état de l'art, le **standard WMTS** définit la structure pyramidale des cartes multi-échelles existantes. Il définit aussi une suite de 21 niveaux de zoom imposant des échelles d'affichages communes, dont l'évolution n'est pas régulière. Ces sauts d'échelles peuvent impliquer **d'importants changements** du contenu cartographique, que le processus de généralisation adapte en fonction de l'échelle, pour respecter les limites des capacités visuelles et d'analyse de l'être humain. Les **transitions de représentation** entre les différents niveaux d'une carte multi-échelle peuvent donc être difficiles à appréhender pour l'utilisateur, qui doit parfois fournir un **effort cognitif** important pour mener à bien sa tâche de navigation. Dans cette thèse, nous souhaitons **améliorer la fluidité de navigation** dans les cartes topographiques multi-échelles, en maitrisant l'évolution du contenu cartographique au fil des échelles pour limiter l'impact de ces changements de représentation inévitables sur la navigation de l'utilisateur.

Cette fluidité de navigation dépend en grande partie de l'interface de visualisation utilisée. Les travaux du domaine de recherche en IHM ont permis d'améliorer considérablement **l'efficacité et l'intuitivité** des interfaces de visualisation cartographique en ligne, permettant notamment de proposer des opérations de zoom continu dans les cartes multi-échelles. Nous pensons donc que les interfaces actuelles permettent en l'état une navigation fluide**, à condition que l'évolution du contenu cartographique le soit aussi, ce qui n'est pas toujours le cas aujourd'hui**. D'autre part, les travaux en IHM ont proposé des méthodes d'interaction avancées pour la visualisation de données cartographiques hétérogènes, comme les loupes, qui permettent d'améliorer la fluidité de navigation. Ces travaux sont abordés dans une autre partie du projet MapMuxing et ne seront pas abordés dans cette thèse. De plus, les interfaces de visualisation standard des cartes multi-échelles, que sont les géoportails, n'implémentent pas encore ces méthodes. Nous concentrons donc nos recherches sur le contenu des cartes multi-échelles, en nous plaçant dans les **meilleures conditions de visualisation existantes**, c'est-à-dire une interface permettant un zoom continu.

Pour améliorer la fluidité d'évolution du contenu cartographique au fil des échelles, nous pensons que **la quantité de changement entre deux représentations cartographiques différentes doit être limitée**. Au-delà des contraintes de lisibilité et de préservation valables pour n'importe quelle carte topographique, nous pensons que maitriser la cohérence du contenu, mais aussi la quantité et la progressivité de changement est ici essentiel pour permettre une navigation fluide dans la carte multi-échelle. Pour améliorer cette progressivité, nous pensons qu'il est nécessaire d'ajouter de nouvelles représentations dans les cartes multi-échelles existantes, que nous appelons **représentations intermédiaires**.

Nous avons vu que les travaux en généralisation continue proposaient des perspectives intéressantes pour construire des états intermédiaires entre deux états connus. Cependant, nous avons également montré que ces méthodes présentaient des limites, notamment sur des plages d'échelles importantes. Nous abordons donc plutôt ce problème avec une **approche multi-niveaux**, tout en gardant la possibilité de compléter ponctuellement nos résultats par une approche continue. Nous essayons ainsi d'améliorer la fluidité d'évolution du contenu cartographique en fonction de l'échelle en produisant des représentations intermédiaires. Ces représentations ont pour but de créer des étapes intermédiaires dans les changements intervenant **entre les niveaux existants** et ainsi faciliter

la compréhension globale des **transitions de représentation**.

Le principal verrou scientifique auquel nous nous attaquons dans cette thèse est donc le paramétrage de **l'évolution du contenu cartographique en fonction de l'échelle**. Pour produire des représentations intermédiaires à de nouvelles échelles, il nous faut en effet choisir le degré de généralisation à utiliser. En pratique, nous nous appuyons sur les nombreux travaux en généralisation existants, notamment réalisés au COGIT au sein duquel nous évoluons. Nous profitons donc de l'implémentation des algorithmes existants quand elle est disponible. Cependant, ces algorithmes étant optimisés pour des structures de données ou des échelles différentes, une modification de leur implémentation est parfois nécessaire.

Par ailleurs, nous avons également constaté dans cet état de l'art que les travaux en termes de généralisation automatique sont suffisamment mûrs pour être utilisés en production, mais qu'ils demandent une modélisation très longue et très coûteuse, pour produire une seule échelle. Dans cette thèse, nous souhaitons produire **plusieurs représentations intermédiaires,** à différentes échelles dont la production n'est pas encore maitrisée, dans des délais limités. Nous n'utilisons donc pas de **processus de généralisation tout-automatique**. Cependant, la plupart des algorithmes de généralisation que nous utilisons sont des processus automatiques, que nous orchestrons manuellement, en choisissant leur ordonnancement, leur contexte d'application, voire leur paramétrage.

Enfin, nous devons également trouver des solutions pour **évaluer la fluidité de navigation** dans une carte multi-échelle. Pour identifier les facteurs influençant potentiellement la fluidité de navigation, nous nous appuyons sur une étude comparative des cartes multi-échelles existantes. Puis, pour estimer leur influence potentielle, nous mettons en place un **test utilisateurs**. Cependant, concevoir une expérience portant sur un contenu cartographique et un processus cognitif aussi complexes peut impliquer de nombreuses variables, et n'amener aucun résultat significatif. Nous devons donc produire du **matériel de test** adéquat et modéliser un **protocole de test** permettant d'évaluer chacune de nos hypothèses.

A.5.2. Démarche Adoptée et Contributions Attendues

Dans un premier temps, nous étudions un panel de cartes topographiques multi-échelles existantes, produites par des producteurs institutionnels européens, par des producteurs privés (Google Maps, Bing Maps) ou par une communauté collaborative (OpenStreetMap). Le Chapitre B présente les critères d'analyse et les résultats de cette étude comparative. Dans cette partie nous caractérisons les systèmes de visualisation multi-échelles utilisés par les pyramides existantes. Puis nous identifions **les facteurs susceptibles de perturber la navigation de l'utilisateur.** En comparant l'évolution du contenu cartographique au fil des échelles, en particulier pour les thèmes du bâti et du routier, nous relevons des **transitions de représentation susceptibles selon nous de faciliter la navigation de l'utilisateur**. Nous utilisons ensuite des mesures d'évaluation de clutter pour estimer **la variation de complexité du contenu cartographique au fil des échelles**.

Puis, à partir de ces premières observations, nous formulons des hypothèses concernant les variables de construction des représentations intermédiaires, susceptibles d'influencer la fluidité de navigation, c'est-à-dire nos **leviers d'amélioration potentielle**. Le Chapitre C détaille ces propositions, qui visent à faciliter les transitions entre deux échelles existantes présentant des

changements de représentations importants.

Dans l'optique de mener un test utilisateurs, nous nous servons ensuite de ces hypothèses pour produire plusieurs représentations intermédiaires qui nous servent de matériel de test. Nous produisons ainsi **quatre versions de transitions de représentation différentes** entre les échelles du 1 : 25k et du 1 : 100k dans la pyramide Scan Express de l'IGN. Le Chapitre D détaille les processus de production de ces représentations intermédiaires. Ce faisant, nous identifions les **verrous techniques et méthodologiques de la production de représentations intermédiaires.**

Enfin, dans le Chapitre E, nous présentons le protocole et les résultats de notre test utilisateurs, dans laquelle nous demandons à plusieurs participants de réaliser une tâche de suivi d'itinéraire sur une carte multi-échelle. En comparant les performances obtenues avec les différentes cartes multi-échelles que nous avons produites et avec la pyramide initiale, nous évaluons **l'amélioration apportée par nos propositions mais aussi la validité de nos différentes hypothèses**. Forts de notre expérience, nous discutons finalement les contributions et les limites de ce test et de notre approche en général.

Chapitre B
Étude de Cartes Multi-Échelles Existantes

Dans ce chapitre, nous présentons une étude comparative de cartes topographiques multi-échelles existantes. Dans un premier temps, nous détaillons les objectifs, panel de pyramides et méthodes d'analyse utilisés (§B.1). Puis en réalisant une première analyse visuelle des pyramides étudiées, nous identifions les facteurs susceptibles selon nous de perturber la navigation de l'utilisateur mais aussi les bonnes pratiques qui semblent la faciliter (§B.2). Nous définissons ensuite l'échelle d'affichage de chaque niveau de zoom de chaque pyramide, pour permettre la comparaison de leur contenu cartographique, et vérifions l'utilisation du standard WMTS dans leurs systèmes de visualisation multi-échelles (§B.3). Puis nous étudions plus en détail l'évolution de la simplification du contenu cartographique des thèmes bâti et routier, en caractérisant les niveaux d'abstraction, processus de généralisation et transitions de représentation utilisés en fonction de l'échelle d'affichage dans les différentes pyramides (§B.4). Enfin, nous analysons la variation de complexité visuelle du contenu cartographique en fonction de l'échelle, pour chacune des cartes multi-échelles étudiées, à l'aide de mesures d'évaluation du clutter (§B.5).

B.1. Objectifs, Panel et Méthodes d'Analyse

La genèse des cartes multi-échelles a été conditionnée par l'évolution très rapide des technologies web et des systèmes de visualisation multi-échelle. Les producteurs cartographiques ont donc souvent produit leur pyramide à partir de cartes existantes, sans remise en question de leur contenu cartographique. Contrairement à la cartographie classique destinée à une impression papier à une échelle unique, la production de carte multi-échelle n'est donc pas régie pour le moment par des connaissances théoriques solides, éprouvées et validées.

Dans cette thèse, nous avons pour but d'améliorer la fluidité de navigation dans les cartes topographiques multi-échelles. Dans un premier temps, il nous faut donc identifier les facteurs qui sont susceptibles de perturber la navigation de l'utilisateur, ainsi que les bonnes pratiques qui semblent la faciliter. Nous cherchons ainsi à produire des connaissances théoriques sur ce qui fait une carte multi-échelle efficace. Pour cela, nous réalisons dans ce chapitre une **étude comparative de cartes topographiques multi-échelles existantes**.

Dans cette première partie nous présentons les études comparatives dont nous nous sommes inspirés, car elles visent également à produire des connaissances sur des pratiques existantes, en étudiant des interfaces ou représentations cartographiques (§B.1.1). Puis nous listons les cartes topographiques multi-échelles que nous avons étudiées (§B.1.2) et détaillons les méthodes d'analyse que nous avons utilisées (§B.1.3).

B.1.1. Exemples d'Études Comparatives en Cartographie

L'idée d'analyser l'existant pour produire des connaissances sur les pratiques n'est pas nouvelle en cartographie et a été appliquée aussi bien pour étudier les représentations cartographiques que les interfaces de visualisation, comme le montrent les exemples suivants.

Une étude compare ainsi 45 applications cartographiques utilisant l'API du Géoportail de l'IGN, pour analyser les pratiques existantes en termes de représentations mixtes entre carte et orthoimage [Hoarau 2012]. Pour cela, l'auteur définit un ensemble de critères d'analyse décrivant les interfaces de visualisation et les outils interactifs proposés. Elle a par exemple listé pour chaque application les types de représentation utilisés (carte, orthoimage ou mixte). L'étude de ces applications lui a permis de définir les tendances et difficultés existantes, donc d'identifier les pistes d'amélioration potentielle. Visant des objectifs similaires, nous devons donc **définir des critères d'analyse, décrivant dans notre cas les différentes pyramides étudiées, aussi bien en termes de visualisation que de représentation du contenu cartographique**.

Cette représentation du contenu cartographique est au cœur des travaux de [Kent et Vujakovic, 2009], qui étudient un panel de 20 cartes topographiques européennes à l'échelle du 1 : 50k au format papier, pour estimer la diversité stylistique existante. Pour cela, les auteurs définissent une typologie d'analyse décrivant la symbolisation, le type et la quantité d'information utilisés. Pour que cette comparaison soit pertinente, ils ne comparent que des cartes sur des zones au contexte géographique similaire (rural, urbain, littoral, montagnard, etc.). Cette étude montre une **hétérogénéité de représentation de l'espace géographique à l'échelle du 1 : 50k entre les producteurs européens**. Cette absence de consensus est également relevée dans [Hopfstock 2007], qui s'intéresse à la représentation du réseau routier dans les cartes européennes institutionnelles et commerciales, à l'échelle du 1 : 250k. L'auteur **relève de nombreuses différences entre les cartes**

étudiées concernant la classification et les symbolisations utilisées, excepté pour les autoroutes dont la modélisation cartographique semble relativement commune. Logiquement nous ne nous attendons donc pas à trouver beaucoup de pratiques communes dans les pyramides existantes en termes de représentation. Néanmoins, ces deux travaux appuient la pertinence de comparer différentes pyramides pour produire des connaissances. En revanche, Ils insistent sur l'importance de réaliser cette comparaison à même échelle et pour un même contexte géographique, pour qu'elle soit pertinente. Pour mener cette étude, **nous devrons donc définir au préalable l'échelle cartographique de chaque niveau, pour chaque pyramide étudiée, et réaliser notre étude en prenant en compte le contexte géographique de la zone étudiée**.

Plus que d'étudier la diversité de représentations existant à une même échelle, nous souhaitons comparer l'évolution de cette représentation en fonction de l'échelle, entre les différentes pyramides. Plusieurs travaux étudient ainsi la diversité de représentations à différentes échelles, pour l'environnement côtier [Forrest et al., 1997], la végétation et l'occupation du sol [Collier et al., 1998], ainsi que pour le relief [Collier et al., 2003]. Pour ce faire, les auteurs analysent des cartes à différentes échelles allant du 1 : 10k au 1 : 1M, au format papier. Ces travaux confirment la **variation des représentations à différentes échelles** pour un même type d'objets géographiques. Dans notre étude, nous analyserons cette variation en comparant les niveaux d'une même pyramide à différentes échelles, pour un thème géographique à la fois. Nous chercherons ensuite à estimer la difficulté cognitive que cette variation implique pour la navigation de l'utilisateur.

B.1.2. Panel de Cartes Topographiques Multi-Échelles Étudiées

La liste suivante indique le producteur cartographique de chacune des seize cartes topographiques multi-échelles que nous avons choisi d'analyser, ainsi que l'adresse URL où nous l'avons étudiée :

- ACT Luxembourg, http://map.geoportail.lu/
- BEV Autriche, http://www.austrianmap.at/amap
- Bing Maps, http://www.bing.com/maps
- GDI-DE Allemagne, http://www.geoportal.de/EN/Geoportal/Maps/maps.html
- Google Maps, http://www.google.fr/maps
- ICGC Catalogne, http://www.icc.cat/vissir3
- IGN Espagne, http://www2.ign.es/iberpix/visoriberpix/visorign.html
- IGN France - Scan Express, étudiée sur une interface temporaire interne à l'IGN, désormais visible sur http://www.geoportail.gouv.fr/ (couche *Carte IGN*)
- IGN France - Scan, http://www.geoportail.gouv.fr/ (couche *Cartes IGN Classiques*)
- Lantmäteriet Suède, http://kso2.lantmateriet.se/
- NGI Belgique, http://www.ngi.be/topomapviewer
- NLS Finlande, http://kansalaisen.karttapaikka.fi/kartanhaku/osoitehaku.html
- OpenStreetMap, http://www.openstreetmap.org/
- OS Irlande, http://maps.osi.ie/publicviewer/
- Swisstopo Suisse, http://map.geo.admin.ch/
- USGS États-Unis, https://viewer.nationalmap.gov/basic/ (version modifiée maintenant disponible sur https://viewer.nationalmap.gov/advanced-viewer/)

Ce panel couvre principalement des **pyramides produites par des agences cartographiques institutionnelles**. Lors de notre étude réalisée en 2015, nous avons choisies parmi les membres de

l'association EuroGeographics[1], celles qui proposaient un géoportail facile d'accès. Nous avons également étudié la pyramide produite par l'USGS États-Unis, qui illustre de nombreux travaux en généralisation cartographique, notamment sur la représentation du relief et de l'hydrographie [Duchêne et al., 2014 pp. 355-362]. Nous aurions également souhaité inclure les produits de l'Ordnance Survey Grande-Bretagne et du Dutch Kadaster des Pays-Bas, qui utilisent des processus tout-automatiques, mais ces producteurs ne fournissaient pas d'interface de visualisation multi-échelle. En plus de ces pyramides institutionnelles, nous avons aussi étudié deux pyramides issues de producteurs privés, **Google Maps et Bing Maps, ainsi que la pyramide OpenStreetMap** produite par une communauté collaborative, toutes trois définies sur une emprise mondiale.

Dans la suite de cette thèse, nous nommerons ces pyramides par le nom de leur producteur, sauf dans le cas de l'IGN, dont nous distinguerons les pyramides Scan Express et Scan IGN. Par ailleurs, les interfaces ou le contenu des pyramides étudiées ont pu être modifiés depuis 2015. Notre étude n'intègre pas ces évolutions et ses données sont parfois obsolètes. Malgré ces modifications ponctuelles, **la problématique de notre étude reste d'actualité et ses résultats nous semblent donc toujours pertinents**.

B.1.3. Méthodes d'Analyse Utilisées

A travers cette étude comparative, nous souhaitons caractériser les tendances en **termes de visualisation et de représentation cartographique dans les cartes topographiques multi-échelles existantes**, pour identifier des **leviers d'amélioration potentielle de la fluidité de navigation**.

Dans la partie §B.2, nous constatons par une première analyse visuelle les facteurs qui nous semblent susceptibles de perturber la navigation de l'utilisateur, mais aussi les pratiques qui semblent la faciliter. Nous définissons ensuite à partir de ces premiers constats les critères d'analyse de notre étude comparative.

En nous inspirant des travaux présentés dans [Hoarau 2012], nous analysons dans la partie §B.3 l'interface des géoportails sur lesquels sont diffusées les pyramides de notre panel, en analysant le système de zoom et les échelles d'affichage utilisés. Puis, nous définissons l'échelle d'affichage de chaque niveau de zoom de chaque pyramide et vérifions l'application du standard WMTS.

Dans la partie §B.4, nous caractérisons plus en détail la relation existant entre cette échelle d'affichage et la simplification du contenu cartographique pour les thèmes du bâti et du routier. Pour cela, nous définissons des critères d'analyse décrivant la simplification du contenu cartographique en nous inspirant des travaux de [Kent et Vujakovic, 2009]. Nous observons ici les pratiques communes, mais aussi les stratégies originales pour définir ce qui permettrait de fluidifier les changements de représentation au fil des échelles et donc faciliter la navigation de l'utilisateur.

Enfin dans la partie §B.5, nous étudions l'évolution de la complexité visuelle au fil des échelles, précédemment identifié comme un facteur de difficulté potentielle pour l'utilisateur. Pour cela, nous estimons la complexité visuelle de chaque niveau de zoom de chaque pyramide, à l'aide de trois méthodes différentes [Rosenholtz et al., 2007 ; Bravo et Farid, 2008 ; Jégou et Deblonde, 2012].

[1] http://www.eurogeographics.org/about/members

La littérature en cartographie montre qu'il est possible de produire des connaissances sur les pratiques existantes, en comparant des produits sur la base de critères d'analyse détaillés. Visant des objectifs similaires, nous menons dans ce chapitre une **étude comparative de 16 cartes topographiques multi-échelles**. Dans la partie suivante, nous réalisons une première analyse visuelle de ces pyramides, d'une part **pour mieux définir les difficultés potentielles de la navigation multi-échelle et d'autre part pour identifier les critères de notre analyse comparative**.

B.2. Facteurs Perturbateurs et Bonnes Pratiques

Nous listons ici les **facteurs qui sont susceptibles selon nous de rendre la navigation multi-échelle difficile, mais aussi les bonnes pratiques qui semblent la faciliter**. Pour cela, nous avons réalisé une première analyse visuelle de chaque pyramide étudiée, réalisée en naviguant sur leur géoportail de diffusion tout en étant attentifs au « *desert fog* » [Jul et Fumas, 1998], lorsque l'on manque de repères dans la carte pour nous orienter dans notre tâche de navigation. Nous avons ainsi procédé à une analyse systématique, en effectuant des opérations de zoom dans chaque géoportail, tout en essayant de nous repérer dans la carte et de reconnaitre des objets cartographiques à différentes échelles. Nous n'avons considéré que les facteurs relatifs au contenu cartographique ou à la configuration du système de visualisation multi-échelle, en faisant abstraction des difficultés liées aux performances de l'interface de visualisation en elle-même (rapidité, ergonomie, outils interactifs, etc.). Cette analyse bénéficie de notre regard de cartographe initié aux problématiques de généralisation, mais aussi de notre expérience d'utilisatrice quotidienne d'applications cartographiques grand public. Néanmoins, elle est sans doute limitée par notre expérience culturelle, c'est-à-dire notre sensibilité aux légendes et choix de représentations de l'IGN. Les résultats de cette partie ont été publiés en partie dans [Dumont et al., 2015].

B.2.1. Hétérogénéité de Légende entre Échelles

L'hétérogénéité de légende est sans doute la cause de gêne la plus importante que nous ayons rencontrée. Les différentes représentations d'une même pyramide peuvent être visuellement très différentes lorsqu'elles utilisent des légendes très différentes, ce qui est fréquent chez les producteurs institutionnels. La Figure 29 compare la pyramide Scan IGN ainsi produite (à gauche), à la pyramide Scan Express qui utilise des légendes plus homogènes aux différentes échelles [Lafay et al., 2015] (à droite), toutes deux produites par l'IGN. L'utilisation d'une légende homogène entre les différents niveaux de la pyramide nous semble ici faciliter la navigation multi-échelle.

Malgré ces précautions, il arrive que des objets **changent ponctuellement de symbolisation.** L'autoroute de la Figure 30 change ainsi de couleur entre les deux échelles (du bleu au rouge), ce qui est dû à l'utilisation d'une classification différente des routes. Lorsque de tels points de repère géographiques ou visuels changent ainsi après un changement d'échelle, l'utilisateur peut éprouver des difficultés à se repérer dans la carte. Nous pensons donc qu'éviter les changements de symbolisation permettrait de faciliter la navigation de l'utilisateur dans une carte multi-échelle.

Pour répondre rapidement à l'apparition des nouveaux systèmes de diffusion et de visualisation de l'information géographique, les producteurs institutionnels ont souvent choisi de construire leur pyramide cartographique à partir de leurs produits cartographiques déjà disponibles, sans réflexion globale sur le rendu multi-échelle. Lorsque ces cartes existantes ont été construites avec des légendes différentes, comme pour Scan IGN, des hétérogénéités apparaissent donc entre les

échelles. Pour les éviter, il faudrait harmoniser la symbolisation de ces cartes existantes dans la pyramide, en adoptant des légendes homogènes aux différentes échelles, comme dans la pyramide Scan Express [Lafay et al., 2015]. Une transition visuelle d'une légende à l'autre pourrait aussi aider l'utilisateur à mieux appréhender ces hétérogénéités. Des travaux récents proposent ainsi des méthodes pour créer des représentations intermédiaires à même échelle mais entre deux styles existants [Ory et al., 2017].

Figure 29. La pyramide Scan IGN à gauche, produite à partir de cartes topographiques avec des légendes très différentes et la pyramide Scan Express à droite, produite avec des légendes plus homogènes [Lafay et al., 2015].

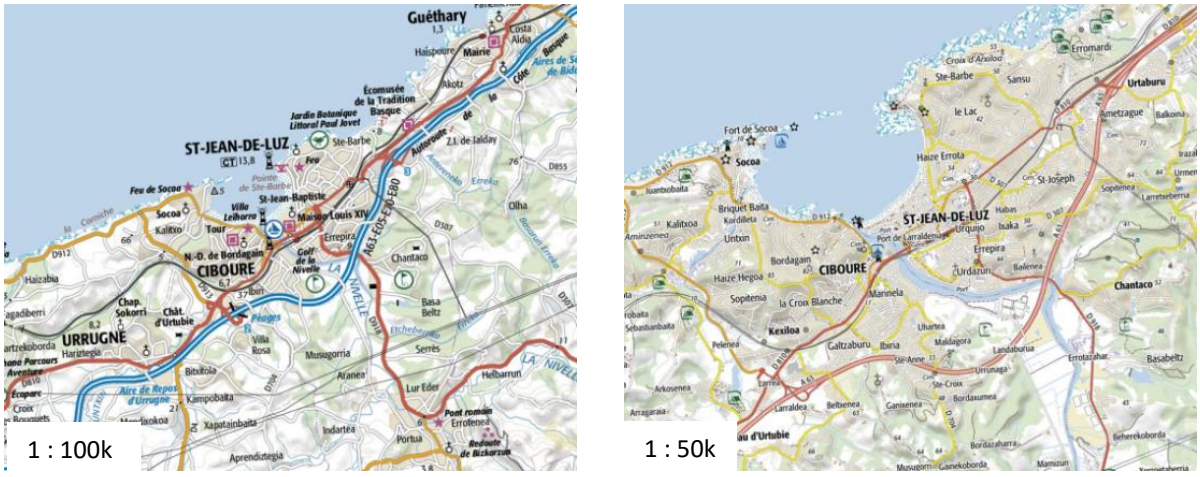


Figure 30. Deux niveaux de zoom consécutifs de la pyramide Scan Express : l'autoroute, particulièrement saillante en bleu à gauche, change de couleur et devient rouge à droite.

Les hétérogénéités de symbolisation nous semblent donc être un facteur majeur de désorientation pour la navigation multi-échelle. Néanmoins, des propositions d'amélioration existent déjà dans la littérature. Nous considérons donc ici qu'il est plus pertinent de réserver nos efforts pour des questions moins explorées et **choisissons de ne pas considérer ces facteurs dans notre thèse**. Pour écarter un biais potentiel dû à ce facteur, nous considérerons dans nos travaux une situation initiale basée sur la pyramide Scan Express, qui utilise une légende homogène aux différentes échelles. Nous nous autoriserons aussi dans notre cas d'application à modifier localement la symbolisation des repères visuels majeurs si celle-ci n'est pas cohérente aux différentes échelles, comme dans l'exemple de la Figure 30.

B.2.2. Incohérences de Contenu entre Échelles

La seconde source de désorientation que nous ayons rencontrée concerne les **incohérences de contenu entre les différents niveaux** d'une carte multi-échelle. Nous parlons de ce type d'incohérences lorsque le contenu cartographique d'un niveau de zoom n'est pas cohérent avec :

- le contenu du **niveau de zoom plus détaillé** qui le précède immédiatement, par exemple quand de nouveaux objets sont apparus ;
- le contenu du **niveau de zoom moins détaillé** qui lui succède immédiatement, par exemple quand des objets ont été éliminés alors qu'ils étaient encore présents à plus petite échelle.

La Figure 31 montre deux niveaux de zoom consécutifs de la pyramide Scan IGN, où l'on trouve plusieurs incohérences de contenu. Ici entourés en rouge, la route et les bâtiments semblent différents entre les deux échelles. Ces incohérences peuvent être dues à des hétérogénéités dans les données sources, par exemple une granularité différente (taille des détails du bâti) ou une date de mise à jour différente (route construite entre les deux dates).

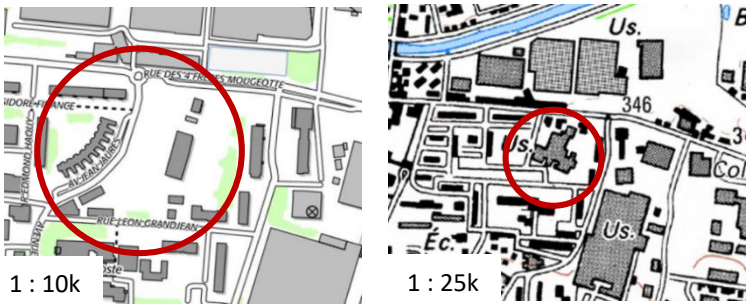


Figure 31. Ces deux niveaux de zoom consécutifs de la pyramide Scan IGN présentent (outre une différence de symbolisation) une représentation incohérente pour le bâtiment entouré.

La Figure 32 montre quant à elle trois niveaux de zoom consécutifs de la pyramide Google Maps, dans lesquels un toponyme (à gauche) est éliminé (au milieu) puis présent à nouveau (à droite). Ici le niveau de zoom du milieu n'est pas cohérent avec le niveau de zoom moins détaillé existant (à droite). Nous pensons que l'utilisateur peut être perturbé par cet effet visuel de clignotement ou *flickering effect* en anglais [Schwartges et al., 2013], créé par la disparition puis l'apparition d'un objet durant une opération de zoom. Pour éviter ces incohérences lors de la généralisation d'une nouvelle représentation dans une carte multi-échelle, [Girres et Touya, 2014] proposent de prendre en compte la représentation existant au niveau moins détaillé qui suit, comme mentionné dans la partie §A.2.4.

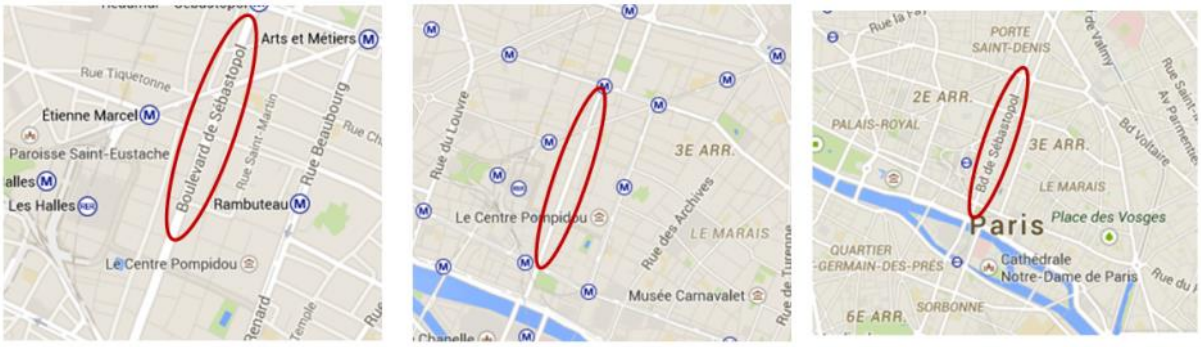


Figure 32. Incohérence de contenu entre trois niveaux consécutifs de la pyramide Google Maps : le nom de la rue entouré disparait puis réapparait à l'échelle suivante.

Par ailleurs, la Figure 33 montre que la **position d'un toponyme peut être très variable** entre les différents niveaux d'une carte multi-échelle, si un algorithme d'optimisation de placement est appliqué à chaque niveau de façon indépendante. Nous pensons que ce « mouvement » des toponymes par rapport au fond cartographique doit être limité, car il peut attirer le regard de l'utilisateur et lui faire perdre ses repères. Pour cela, nous pourrions utiliser une méthode de placement des toponymes qui en plus d'optimiser leur répartition spatiale à une échelle donnée, optimiserait leur conservation sur la plage d'échelles globale, à l'image des travaux de [Schwartges et al., 2013], précédemment mentionnés dans le paragraphe §A.2.4.

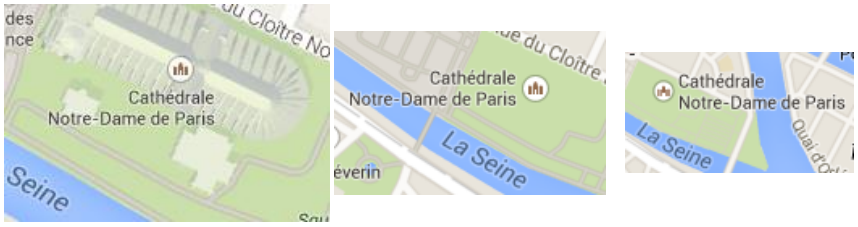


Figure 33. Le toponyme « Cathédrale Notre-Dame de Paris » prend une position variable par rapport à son point de référence, entre les différents niveaux de zoom de la pyramide Google Maps.

Ces incohérences de contenu peuvent résulter de l'utilisation d'un processus de production ou de généralisation différent en fonction de l'échelle. Ce phénomène local peut sembler peu important pour la compréhension et l'utilisation globale de la carte multi-échelle. Néanmoins, elles peuvent impliquer des « effets visuels », comme un clignotement ou un mouvement de l'objet incohérent, qui peut attirer le regard de l'utilisateur et lui faire perdre ses repères. Pour faciliter la navigation dans une carte multi-échelle, nous pensons donc que ces incohérences doivent être évitées. La littérature en généralisation multi-échelle propose des méthodes permettant d'éviter cet écueil, comme la généralisation en échelle [Stoter 2005] où chaque nouvelle carte moins détaillée est généralisée à partir du contenu de la précédente, assurant ainsi leur cohérence. La littérature propose également des méthodes de généralisation considérant la plage d'échelle globale [Raposo et al., 2013 ; Schwartges et al., 2013 ; Bereuter 2014], permettant d'assurer la cohérence entre les différentes échelles comme précédemment mentionné dans la partie §A.2.4. Considérant donc que des méthodes existent déjà pour résoudre cette problématique, **nous choisissons de ne pas considérer ce facteur dans notre thèse**. Pour écarter ce biais potentiel, dans la suite de nos travaux nous vérifierons la cohérence des niveaux existants de notre pyramide initiale, en nous autorisant à corriger les incohérences majeures détectées, et choisirons une méthode globale pour le placement des toponymes.

B.2.3. Adaptation du Contenu Cartographique à l'Échelle d'Affichage

Nous considérons maintenant les difficultés liées à l'adaptation du contenu cartographique à l'échelle d'affichage. Le nombre de niveaux de zoom proposés sur leur géoportail est souvent supérieur au nombre de cartes existantes dont les producteurs institutionnels disposent. **Ils utilisent donc souvent une même carte à plusieurs niveaux de zoom consécutifs**. La Figure 34 montre ainsi six niveaux de zoom consécutifs de la pyramide Scan IGN, utilisant un même contenu cartographique pour deux niveaux de zoom consécutifs, et ce plusieurs fois (niveaux 15-14, 13-12 et 11-10). Une carte définie pour une échelle cartographique donnée peut donc être visualisée à plusieurs échelles d'affichage différentes. Cette pratique peut impliquer des problèmes de lisibilité, si un contenu cartographique est utilisé au-delà de sa plage de validité graphique. Une piste d'amélioration

potentielle pourrait donc être de **produire de nouvelles représentations pour ces niveaux de zoom utilisant un contenu cartographique non adapté**.

Figure 34. Six niveaux de zoom (LoZ) consécutifs de la pyramide Scan IGN, utilisant deux à deux un même contenu cartographique (niveaux 15-14, 13-12 et 11-10).

Dans la Figure 34 le contenu semble adapté à l'échelle d'affichage au niveau de zoom 15, puis l'échelle diminue mais le même contenu est utilisé au niveau 14 : la quantité d'information augmente et la taille des objets cartographiques diminue, la carte semble donc visuellement plus complexe qu'à l'échelle précédente. Puis l'échelle diminue encore mais le contenu cartographique est généralisé au niveau 13 et son niveau de détail est simplifié. Ce même contenu est utilisé au niveau 12, sans généralisation, et semble donc visuellement plus complexe qu'au niveau précédent. En particulier, cette pratique implique aussi une variation irrégulière de la taille des toponymes, qui diminue en passant des niveaux 13 à 12 puis augmente au niveau 11. **Nous pensons que ces variations irrégulières peuvent représenter une difficulté cognitive supplémentaire pour l'utilisateur et doivent donc être limitées.**

Que l'on construise une pyramide avec des cartes existantes ou à partir d'une unique base de données détaillées, il est donc nécessaire d'adapter le contenu cartographique de chaque niveau de zoom à son échelle d'affichage. Quelle que soit la stratégie de production de la pyramide, il est donc primordial de considérer la relation entre la simplification de ce contenu et l'échelle d'affichage visée. Si le contenu est trop complexe, l'utilisateur devra fournir un effort cognitif important pour lire et utiliser la carte. Si le contenu est trop simplifié cette fois, l'utilisateur pourra également rencontrer des difficultés pour se repérer dans la carte. Dans cette première analyse des pyramides étudiées, nous avons constaté une grande diversité de simplification du contenu cartographique à une même échelle d'affichage, comme le montre la Figure 35, confirmant l'absence de consensus entre les producteurs sur cette problématique. **Nous considérons ici qu'adapter la complexité du contenu cartographique à l'échelle d'affichage est un facteur primordial de la fluidité de navigation.** Dans la partie §B.3, nous analyserons donc plus en détail la **relation entre l'échelle d'affichage et la**

simplification du contenu cartographique dans les pyramides étudiées, pour mieux la qualifier. Puis dans la partie §B.5, nous évaluerons cette variation de complexité visuelle à l'aide de mesures de clutter.

Figure 35. Complexité du contenu cartographique variable à même échelle entre différents producteurs cartographiques. Extraits : Google Maps, OpenStreetMap, Swisstopo.

B.2.4. Changements de Niveaux d'Abstraction

Dans l'éventualité où le contenu cartographique de chaque niveau de zoom serait bien adapté à son échelle d'affichage, les changements de représentation dus à la **simplification du contenu cartographique** entre deux niveaux consécutifs peuvent parfois suffire à perturber l'utilisateur. La Figure 36 montre ainsi trois niveaux de zoom consécutifs de la pyramide Scan Express, présentant une abstraction différente de l'espace géographique. Rappelons que lors d'un changement d'échelle important, la généralisation du contenu de la carte est souvent nécessaire pour assurer sa lisibilité : ces changements sont donc nécessaires et inévitables. Nous proposons ici **d'ajouter des niveaux de zoom intermédiaires, pour pouvoir introduire de nouvelles représentations, afin de simplifier les transitions de représentation entre les niveaux existants**.

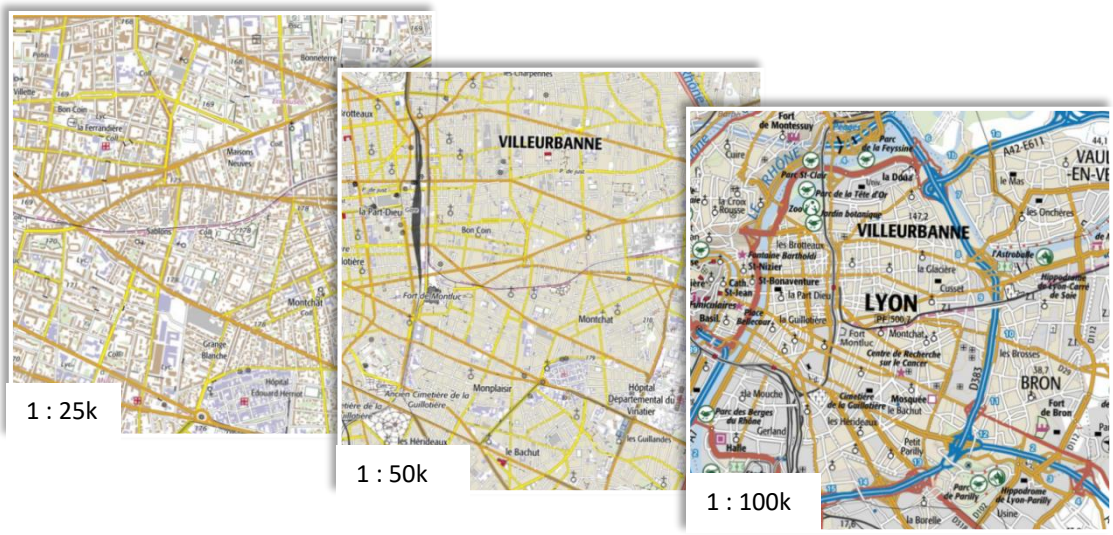


Figure 36. Trois niveaux de zoom consécutifs de la pyramide Scan Express de l'IGN, présentant une abstraction différente du contenu cartographique.

Ces représentations intermédiaires pourront alors être matérialisées comme plusieurs étapes de la transition de représentation, plus faciles à appréhender par l'utilisateur. Pour concevoir ces représentations intermédiaires, de manière à améliorer la fluidité de navigation dans une pyramide, nous étudierons dans la partie §B.4 l'évolution de la simplification du contenu cartographique au fil des échelles dans les pyramides existantes.

Nous avons identifié quatre facteurs majeurs potentiellement responsables des difficultés de navigation existant dans les pyramides étudiées **: les hétérogénéités de légende, les incohérences de contenu, la non-adaptation du contenu à son échelle d'affichage et les changements de niveau d'abstraction**. Dans cette thèse, nous choisissons de nous concentrer sur ces deux derniers facteurs. Nous chercherons donc en particulier à mieux qualifier **la relation entre la simplification du contenu cartographique et l'échelle d'affichage**. Pour cela, nous définissons au préalable **l'échelle d'affichage de chacun de leurs niveaux de zoom**, dans la partie suivante.

B.3. Zoom, Échelles d'Affichage et Échelles de Symbolisation

Dans cette partie, nous analysons les géoportails à travers lesquels sont diffusées les cartes multi-échelles étudiées, en caractérisant le système de zoom utilisé (§B.3.1), continu ou non, ainsi que les échelles d'affichage disponibles (§B.3.2). Nous définissons ensuite une première relation entre l'échelle d'affichage et la simplification du contenu cartographique (§B.3.3). Cette partie reprend des résultats publiés dans [Dumont et al., 2016b].

B.3.1. Systèmes de Zoom Utilisés

Lors de notre relevé (début 2015), seul le géoportail du BEV Autriche n'intégrait et n'intègre toujours pas de système de zoom relié aux interactions de la molette de la souris : il faut cliquer sur différents boutons pour afficher les différentes échelles. Les autres géoportails étudiés utilisaient alors un système de zoom classique, où le nombre de niveaux de zoom disponibles est limité et où les valeurs d'échelles d'affichage associées sont fixées par le producteur. Début 2018, seul le géoportail de l'ICGC Catalogne implémente encore ce système de zoom classique. Les autres géoportails utilisent désormais un système de zoom animé ou continu, dont la Figure 37 compare les principes.

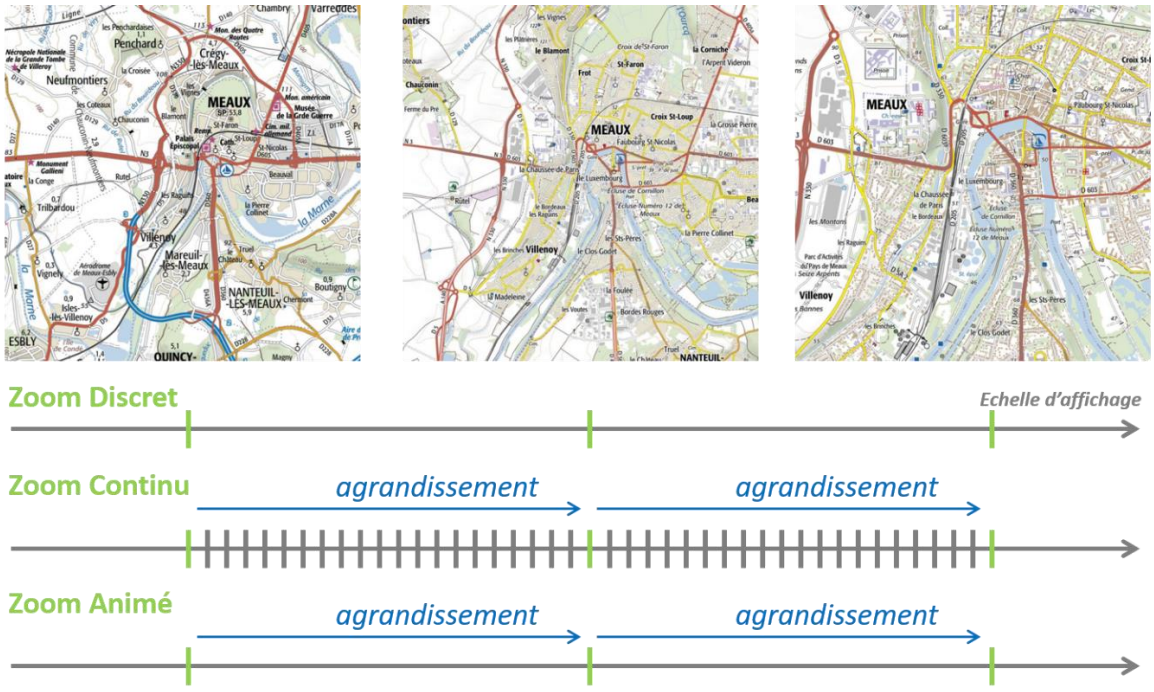


Figure 37. Comparaison entre les différents systèmes de zoom existants : discret, continu et animé. Les tirets représentent les échelles où il est possible d'arrêter une opération de zoom (non exhaustif pour le zoom continu). Les tirets verts en particulier représentent les niveaux de zoom où la représentation cartographique change.

Grâce à l'implémentation d'API cartographiques telles que Leaflet ou OpenLayers, la grande majorité des géoportails proposent désormais un zoom animé, c'est-à-dire que les échelles d'affichage disponibles sont toujours fixes, mais la navigation d'une échelle à l'autre est visuellement animée par un agrandissement « photo » de la carte précédente. Comme Google Maps, quelques géoportails intègrent par ailleurs un système de zoom continu, permettant à l'utilisateur de stopper son opération de zoom à n'importe quelle échelle d'affichage. Néanmoins, nous avons constaté que certains géoportails intègrent simultanément un zoom continu sur les versions mobiles de leurs interfaces, mais seulement un zoom animé sur leurs interfaces classiques. C'est notamment le cas du géoportail de l'IGN ou de Swisstopo.

L'utilisation du système de zoom continu tend donc à se démocratiser, prouvant que nous pourrions **ajouter des représentations intermédiaires à des niveaux de zoom supplémentaires dans les pyramides existantes, sans modification majeure de leur interface de visualisation**.

B.3.2. Échelles d'Affichage Utilisées

Dans ce paragraphe, nous nous intéressons à **la suite d'échelles d'affichage disponible pour visualiser chacune des pyramides étudiées**. Précisons ici que, quel que soit le système de zoom utilisé (continu ou non), une carte multi-échelle est toujours composée d'une suite finie de niveaux de zoom, définis par une échelle d'affichage et un contenu cartographique. C'est uniquement le système de visualisation qui génère les représentations affichées aux échelles intermédiaires en zoom continu ou animé, par agrandissement « photo » de la représentation précédente disponible.

Notre intérêt principal est ici de définir l'échelle d'affichage de chaque niveau, pour pouvoir comparer deux niveaux issus de pyramides différentes à même échelle. Pour ce faire, nous avons calculé les échelles d'affichage utilisées par chaque géoportail, en mesurant manuellement les barres d'échelle graphiques disponibles. Le protocole et la pertinence de ce relevé sont détaillés en Annexe A. Ces mesures pouvant varier d'un écran à l'autre, nous avons au préalable vérifié leur cohérence à partir de quelques distances terrain connues. **Bien que nous ayons constaté une certaine variation, nous considérons que celle-ci est négligeable au regard du niveau de précision de notre analyse globale.**

La Figure 38 représente la distribution des échelles d'affichage utilisées dans les pyramides de notre panel d'étude. De manière générale, nous constatons que la plage d'échelles globale utilisée varie selon le géoportail. Elle dépend en effet de l'emprise géographique du territoire concerné : plus la zone à représenter est grande, plus les petites échelles sont nécessaires. On peut cependant noter que **la plage d'échelle entre les échelles 1 : 10k et 1 : 1,5M (en vert) est commune à toutes les pyramides étudiées.** En termes de contenu, ces échelles correspondent respectivement à l'échelle du quartier et de l'état selon les ordres de grandeur de [Lacoste 1980, p21], ce qui est logique puisque nous avons essentiellement étudié des pyramides institutionnelles nationales.

Par ailleurs, nous remarquons que les niveaux de zoom semblent **respecter la suite d'échelles d'affichage définie par le standard WMTS** (cf. §A.3.4), dont les niveaux de zoom sont ici représentés en rouge. Néanmoins, certaines applications ajoutent des niveaux de zoom à ceux définis par le standard, que l'on remarque par des points plus rapprochés pour le géoportail de Lantmäteriet Suède par exemple (en noir). Ce géoportail disposait également d'un niveau de zoom à l'échelle 1 : 33, plus détaillé que le premier niveau du standard à l'échelle 1 : 100. L'emprise affichée à cette

échelle est comprise à l'intérieur même d'un bâtiment, sans toutefois proposer de données à ce niveau de détail. Cette échelle supplémentaire était donc peu pertinente selon nous et a d'ailleurs été supprimé depuis. De manière générale, ces niveaux de zoom supplémentaires semblent faciliter la navigation multi-échelle, en rendant la transition de représentation plus progressive et en permettant mieux d'adapter l'échelle de visualisation au cas d'application de l'utilisateur.

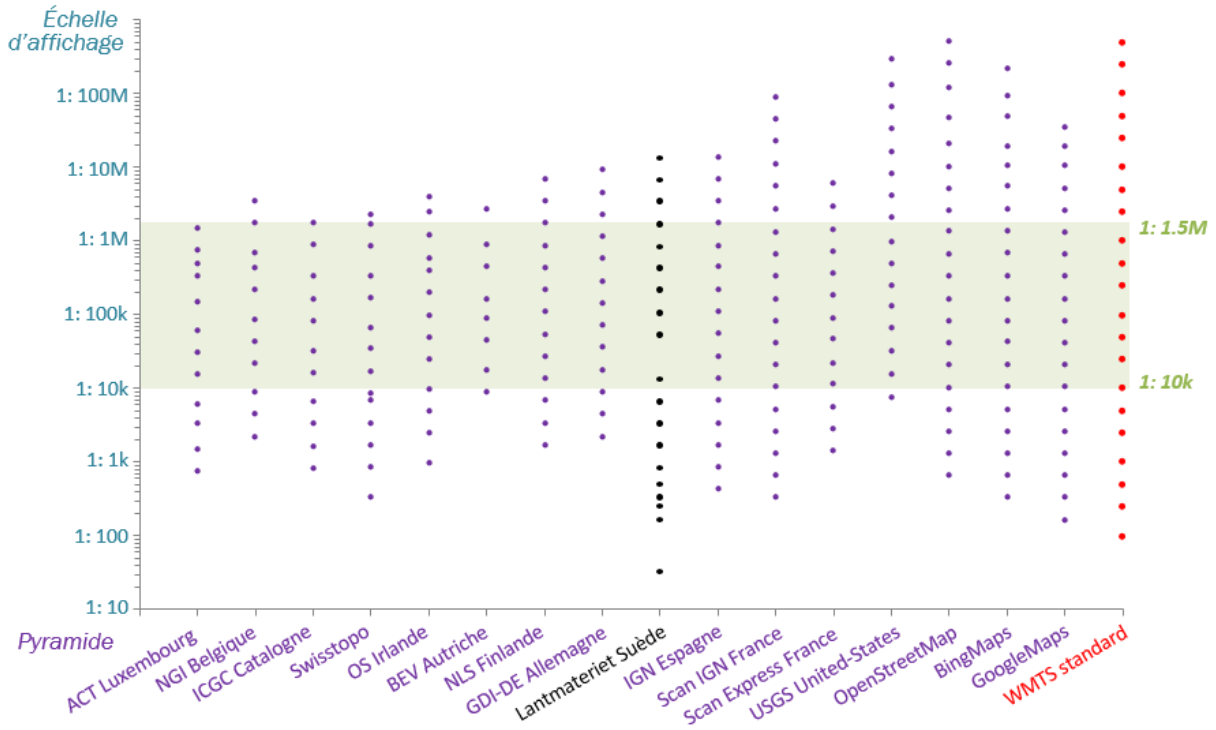


Figure 38. Distribution des échelles d'affichage utilisées dans les pyramides étudiées.

En écartant ces quelques transgressions du standard, nous avons ensuite **mis en correspondance chaque niveau de zoom de chaque pyramide étudiée avec un niveau de zoom du standard WMTS**, par proximité d'échelle d'affichage. La Figure 39 représente cette relation pour l'ensemble des pyramides étudiées, qui est par ailleurs détaillée pour chaque pyramide en Annexe B.

Ici nous considérons que la plupart des niveaux de zoom présentent une faible dispersion, excepté le niveau de zoom 8 du standard WMTS. Nous avons observé que **85% des géoportails utilisent en pratique deux niveaux de zoom différents entre les échelles 1 : 750k et 1 : 2M, au lieu d'un à l'échelle 1 : 1M**. Cette pratique commune peut ici découler d'un besoin de diminuer les sauts d'échelles existants, ou bien simplement être appliquée par les producteurs car ils disposent de produits cartographiques mieux adaptés à ces échelles.

Par ailleurs, puisque la courbe de tendance des échelles d'affichage (en vert) et celle du standard WMTS (en rouge) sont assez proches, nous considérons que les pyramides étudiées implémentent le standard WMTS. Ce faible écart entre les courbes peut être imputé à l'imprécision de nos mesures, mais aussi à l'adaptation du standard défini en WGS84, au système de projection cartographique utilisé par le producteur.

Confirmer ainsi l'application du standard WMTS en pratique nous permet de mieux connaitre l'évolution générique des échelles d'affichage et d'identifier les échelles où un niveau de zoom

supplémentaire serait nécessaire. Dans cette thèse, **nous nous concentrons sur les grandes et moyennes échelles**, où le besoin de généralisation du contenu cartographique, les changements de représentation et donc le potentiel d'amélioration de la fluidité de navigation sont particulièrement importants. Par ailleurs, la définition des échelles d''utilisation commune du standard WMTS nous permet désormais de **comparer pour chaque niveau de zoom les représentations utilisées par les différentes pyramides**. Connaissant ainsi la suite d'échelles d'affichage utilisées par les pyramides existantes, nous pouvons aussi étudier **l'évolution de la représentation du contenu cartographique au fil des échelles**.

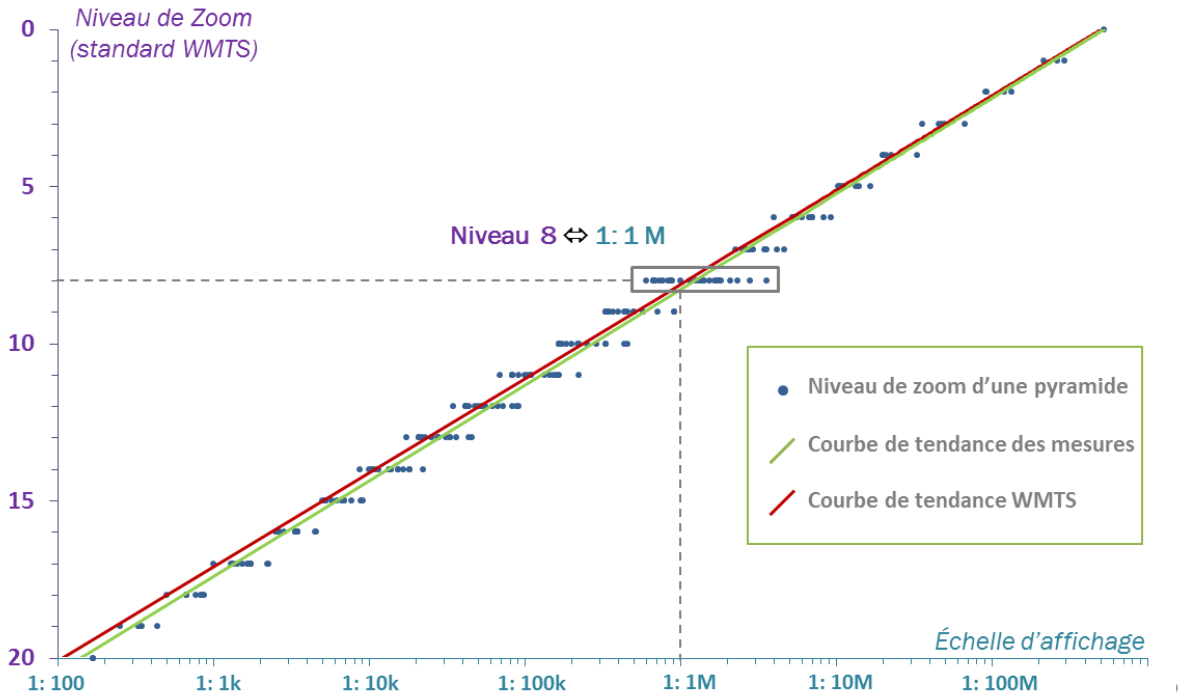


Figure 39. Dispersion des échelles d'affichage en fonction du niveau de zoom standard WMTS.

B.3.3. Relation entre Échelle d'Affichage et Échelle de Symbolisation

Nous avons précédemment observé que certains producteurs cartographiques institutionnels utilisent une même carte, définie pour une échelle cartographique particulière, à plusieurs échelles d'affichage consécutives. Pour clarifier notre propos, nous distinguerons dans le reste de cette thèse l'**échelle de symbolisation**, c'est-à-dire l'échelle pour laquelle la carte a été initialement produite et qui a déterminé notamment la taille de ces symboles, de **l'échelle d'affichage** à laquelle elle est finalement diffusée. Nous pourrons également dire qu'une carte a été **définie** pour une échelle donnée et est finalement **affichée** à une ou plusieurs autres échelles.

Comme déjà mentionné, les producteurs cartographiques ne disposent généralement pas de suffisamment de cartes pour fournir une représentation adaptée à chaque niveau de zoom de leur géoportail. Exceptés les quelques producteurs qui ont construit leur pyramide comme un nouveau produit cartographique global, ils utilisent donc souvent un même contenu à plusieurs niveaux de zoom consécutifs, ce qui peut impliquer des problèmes de lisibilité notamment. Dans ce paragraphe, nous analysons cette pratique plus en détail pour identifier les niveaux de zoom concernés et la **relation utilisée entre l'échelle de symbolisation de la carte existante et l'échelle d'affichage à laquelle elle est finalement affichée**.

Ce volet de l'étude n'intègre **que les cartes multi-échelles institutionnelles construites à partir de cartes topographiques existantes** que nous avons pu identifier. Si l'échelle de symbolisation n'était pas explicitement mentionnée dans l'application, nous l'avons définie par comparaison avec les cartes topographiques éditées sur papier par le producteur correspondant. La Figure 40 représente la relation entre échelles d'affichage (en abscisse) et échelles de symbolisation (en ordonnée) pour les pyramides étudiées. Chaque point représente un niveau de zoom distinct, sa couleur indiquant la pyramide dont il est issu.

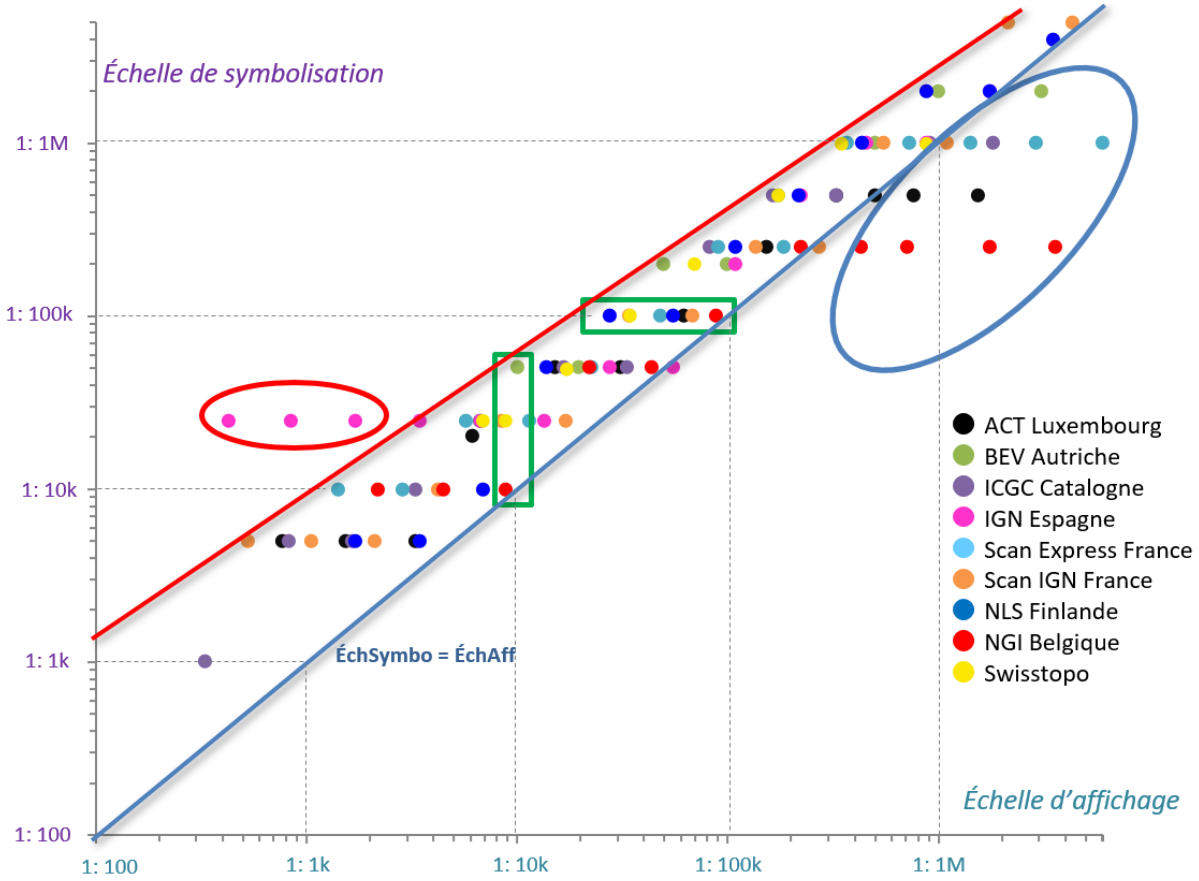


Figure 40. Relation entre échelles d'affichage (en abscisse) et échelles de symbolisation (en ordonnée) pour chaque niveau de zoom de chaque pyramide étudiée. Les encadrés verts montrent qu'il n'y a pas de consensus entre les producteurs sur cette relation. Cependant, les lignes rouges et bleues encadrant la majorité des points représentés indiquent une tendance dans cette relation. Les valeurs qui ne suivent pas cette tendance (ellipses rouge et bleue) présentent d'ailleurs un contenu non adapté à l'échelle d'affichage.

Lorsque l'on regarde ce graphique en détail, les groupes de points encadrés en vert sur la Figure 40 montrent qu'à une même échelle d'affichage, différentes échelles de symbolisation peuvent être utilisées (encadré vert vertical) et que des cartes à même échelle de symbolisation peuvent être affichées à des échelles d'affichage variables (encadré vert horizontal) : **il n'y a pas donc pas de consensus entre les producteurs sur une relation mathématique précise entre échelle de symbolisation et échelle d'affichage**. En revanche, l'ensemble des points montre une tendance commune, encadrée par deux droites représentées sur la Figure 40. La droite bleue à droite représente la fonction « échelle de symbolisation est égale à échelle d'affichage ». Une carte existante est donc généralement affichée jusqu'à une échelle d'affichage équivalente à son échelle

de symbolisation. L'équation de la droite rouge à gauche est moins significative, mais il y a en moyenne un facteur 4 entre l'échelle de symbolisation et l'échelle d'affichage pour ces bornes minimales. Une carte existante est donc généralement affichée à partir d'une échelle d'affichage équivalente au quart de son échelle de symbolisation. Si l'on prend en compte les différences d'échelles entre géoportails et l'approximation de nos mesures, on peut dire qu'en moyenne, les producteurs semblent donc **afficher une carte au double de son échelle de symbolisation** : une carte produite pour le 1 : 50k sera ainsi affichée au 1 : 25k. Nous expliquons cette pratique par la différence d'acuité visuelle de l'être humain sur papier et sur écran [Jenny et al., 2008 ; Ware 2013, Chapitre 2], car la taille, la résolution, les conditions d'éclairement et la distance d'utilisation de ces deux supports sont généralement différentes. Les seuils de lisibilité sont donc différents sur papier ou sur écran et une carte existante devra être agrandie, donc affichée à plus grande échelle, pour être lisible.

Les niveaux de zoom entourés sur la Figure 40 ne respectent pas cette tendance et présentent des problèmes de lisibilité. Quand la carte est affichée à une échelle plus grande (ellipse rouge à gauche), la représentation cartographique est trop agrandie et pixélisée, comme le montre l'extrait à gauche de la Figure 41. Au contraire, quand la carte est affichée à une échelle plus petite (ellipse bleu à droite), le contenu cartographique n'est pas assez simplifié pour être lisible, comme le montre l'extrait à droite de la Figure 41. **Nous pensons donc que lorsque l'on produit une carte multi-échelle à partir de cartes existantes, cette relation doit être respectée pour assurer la lisibilité du contenu cartographique.** Ce graphique confirme également que de nombreux producteurs institutionnels utilisent un même contenu à plusieurs échelles d'affichage consécutives, lorsque deux points de la même couleur sont sur la même ligne horizontale sur la Figure 40. **Cette observation confirme le besoin de nouvelles représentations pour ces niveaux de zoom.**

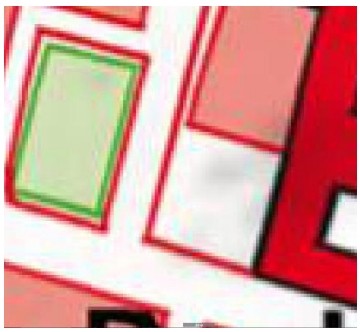


Figure 41. Extraits des niveaux de zoom correspondants aux valeurs extrêmes, pour IGN Espagne (extrême gauche, ellipse rouge sur la Figure 40) et Scan Express (extrême droite, ellipse bleue).

D'une part, la démocratisation des systèmes de zoom continu confirme la faisabilité de notre théorie : il est possible **d'ajouter des niveaux de zoom pour fluidifier la navigation** dans les cartes multi-échelles existantes. D'autre part, l'étude de la relation entre échelles de symbolisation et échelles d'affichage nous a permis de mettre en évidence une tendance générale dans l'utilisation des cartes existantes, à respecter pour éviter les problèmes de lisibilité. En revanche, pour caractériser la relation entre la simplification du contenu cartographique et l'échelle d'affichage, il nous faudra **analyser plus en détail l'évolution de la représentation du contenu cartographique en fonction de l'échelle dans les pyramides étudiées.**

B.4. Évolution du Contenu Cartographique en Fonction de l'Échelle d'Affichage : Focus sur les Thèmes du Bâti et du Routier

Nous avons montré que les cartes multi-échelles existantes pouvaient être améliorées en produisant des représentations intermédiaires aux niveaux de zoom où le contenu n'est pas adapté à l'échelle d'affichage. Nous avons aussi confirmé la démocratisation du zoom continu, prouvant qu'il était envisageable d'ajouter des niveaux de zoom sans révolutionner les interfaces de visualisation existantes. Nous analysons maintenant plus en détail la représentation du contenu cartographique, pour identifier une **relation entre simplification du contenu et échelle d'affichage**. Cette partie reprend des résultats publiés dans [Dumont et al., 2016b].

B.4.1. Choix et Protocole d'Analyse

Les études comparatives précédemment mentionnées [Forrest et al., 1997 ; Collier et al., 1998 ; Collier et al., 2003 ; Kent et al., 2009] nous ont montré qu'il était difficile de comparer la représentation globale du contenu cartographique entre deux cartes différentes : il est plus aisé de distinguer chaque thème géographique. Cette étude étant relativement coûteuse en temps, nous avons choisi de nous limiter aux **thèmes du bâti et du routier**, car ils sont essentiels à la structuration et la compréhension de l'espace géographique, mais aussi parce qu'ils sont particulièrement saillants dans la carte. Un changement de leur représentation au fil des échelles pourrait donc avoir un impact important sur la faculté de l'utilisateur à se repérer dans la carte, donc sur son efficacité à accomplir une tâche de navigation multi-échelle.

Plus la simplification du contenu sera importante entre deux niveaux de zoom consécutifs, plus la transition de représentation pourra être difficile à comprendre pour l'utilisateur. Pour étudier l'évolution de leur représentation, nous avons donc choisi de caractériser cette simplification en fonction de l'échelle d'affichage. **Nous avons ainsi relevé les niveaux d'abstraction et les processus de généralisation utilisés pour représenter les objets bâtis et routiers, à chaque niveau de zoom de chaque pyramide étudiée**. Pour comparer ces notions relativement variables d'un producteur à l'autre, nous avons défini des typologies d'analyse respectivement présentées dans le paragraphe §B.4.2 pour le thème du bâti et §B.4.4 pour le thème du routier.

Pour chaque carte multi-échelle, nous avons **identifié une zone géographique représentative**, c'est-à-dire susceptible de présenter la plus grande diversité possible de niveaux d'abstraction et de processus de généralisation. La généralisation des thèmes bâti et routier dépendant beaucoup de la densité urbaine, **nous avons systématiquement choisi une zone urbaine et une zone rurale**, pour chaque pyramide. Nous avons ensuite **relevé dans chacune de ces zones la présence des différents niveaux d'abstraction et l'application des différents processus de généralisation** selon nos typologies. Pour réaliser cet exercice, nous nous sommes appuyés sur nos connaissances des processus de généralisation utilisés par les producteurs concernés et par reconnaissance visuelle. Ce relevé n'est donc bien sûr pas exhaustif : distinguer visuellement l'utilisation d'un processus de généralisation n'est pas toujours évident. Nous considérons néanmoins ce niveau d'analyse suffisant car nous nous intéressons surtout aux changements visuels importants, susceptibles de perturber l'utilisateur.

B.4.2. Critères d'Analyse du Bâti en Fonction de l'Échelle d'Affichage

Pour le thème du bâti, nous définissons ainsi quatre niveaux d'abstraction, illustrés par la Figure 42 :

- **Bâtiment individuel** : polygone représentant un bâtiment existant ;
- **Ilot urbain** : polygone représentant une unité de l'espace urbain, délimité par des tronçons routiers ou par les limites de la ville ;
- **Aire urbaine** : polygone représentant une région incluant une ville et sa banlieue, caractérisée par une forte densité urbaine et de population ;
- **Ville ponctuelle** : point généralement couplé à un toponyme représentant une ville entière.

Figure 42. Typologie des niveaux d'abstraction définis pour le thème du bâti, respectivement de gauche à droite : bâtiment individuel, ilot urbain, aire urbaine et ville ponctuelle. Extraits : ICGC Catalogne.

Nous ne différencions pas les natures ou fonctions des bâtiments individuels, même quand elles sont distinguées par des symbolisations différentes. Même s'il est courant de prendre en compte ces caractéristiques dans le processus de généralisation, pour conserver les bâtiments importants, il serait très difficile de le constater par une simple analyse visuelle. En revanche, la manière d'utiliser deux niveaux d'abstraction dans un même niveau de zoom, ce que nous appelons une **représentation mixte**, nous intéresse particulièrement pour la production de représentations intermédiaires. Nous relevons donc le type de représentations mixtes, en distinguant les deux types suivants, illustrés par la Figure 43:

- les représentations **conjointes**, lorsque deux niveaux d'abstraction sont utilisés pour des objets différents à même échelle, en fonction du contexte géographique notamment (ici en fonction de la densité bâtie, les objets bâtis sont représentés par du bâti individuel ou des ilots urbains);
- les représentations **simultanées**, lorsque deux niveaux d'abstraction sont utilisés à même échelle, pour représenter simultanément les mêmes objets (ici les objets bâtis individuels sont superposés à l'aire urbaine).

Figure 43. Représentations mixtes distinguées dans cette étude : une représentation conjointe des bâtiments individuels et des ilots urbains, en fonction de la densité locale à gauche (Extrait : ICGC Catalogne) et une représentation simultanée des bâtiments individuels et de l'aire urbaine à droite (Extrait : Lantmäteriet Suède).

En plus de ces changements de niveaux d'abstraction, des processus de généralisation permettent d'adapter plus finement la simplification du bâti à l'échelle d'affichage. Un état de l'art des différents processus existants pour le bâti est disponible dans [Regnauld & McMaster, 2007]. Nous avons choisi de n'observer que les processus dont nous pouvions détecter l'usage en observant visuellement les cartes et qui ont selon nous une influence potentielle sur la fluidité de navigation. Nous avons donc relevé l'utilisation des processus suivants, illustrés par la Figure 44:

- **sélection** (ou élimination) : préserve ou élimine un objet, en fonction de ses caractéristiques géométriques (taille, forme) ou sémantiques (fonction, nature) ;
- **simplification** : supprime les détails de la géométrie pour faciliter sa lisibilité ;
- **agrégation** (ou amalgamation, fusion) : regroupe plusieurs objets en une seule géométrie ;
- **typification** : réduit le nombre d'objets tout en préservant l'organisation spatiale du groupe.

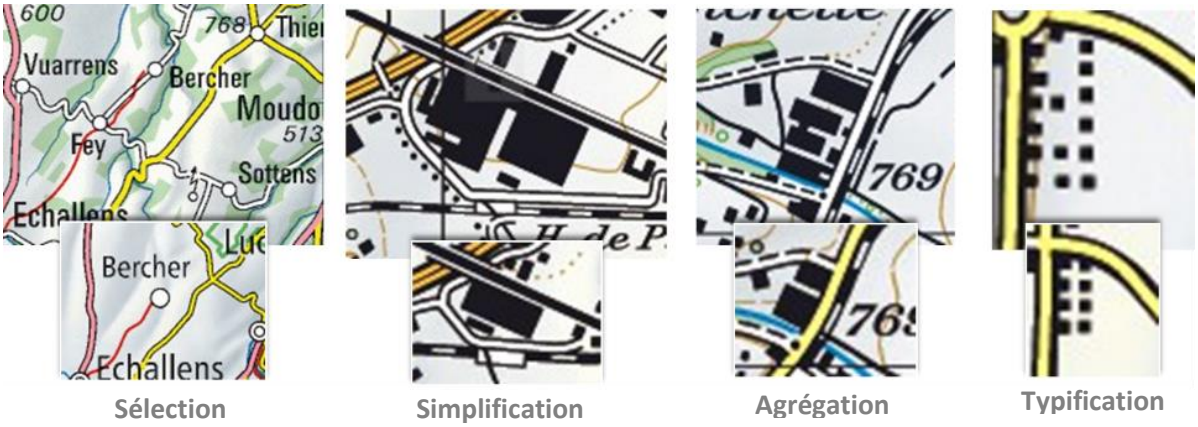


Figure 44. Typologie des processus de généralisation utilisée pour le thème du bâti. Extraits : Swisstopo

Pour faciliter leur interprétation, les résultats de cette analyse sont ensuite reportés sur un graphique, dont la légende est présentée dans la Figure 45. Pour chaque pyramide indiquée en ordonnée, on représente les informations suivantes en fonction de l'échelle d'affichage donnée en abscisse :

- les **niveaux de zoom** disponibles, symbolisés par un trait rouge vertical ;
- la présence de chaque **niveau d'abstraction**, représentée par une bande grise horizontale, dont le niveau de gris indique le niveau d'abstraction en question : pour représenter de manière continue nos mesures faites aux échelles d'affichage discrètes, nous supposons qu'un changement de représentation intervient au milieu de deux échelles connues ;
- lorsque deux niveaux d'abstraction sont utilisés conjointement dans un même niveau de zoom, l'aspect du niveau de zoom symbolise la nature de la **représentation mixte :** une représentation simultanée si le trait rouge est en pointillés, une représentation conjointe sinon ;
- le **contexte géographique** pour lequel un niveau d'abstraction est utilisé, précisé par l'annotation « Urbain » ou « Rural », rien si le niveau d'abstraction est présent indépendamment du contexte ;
- l'utilisation de chaque **processus de généralisation**, par la présence du code correspondant (Se, Si, Ag, Ty) à droite du niveau de zoom résultat.

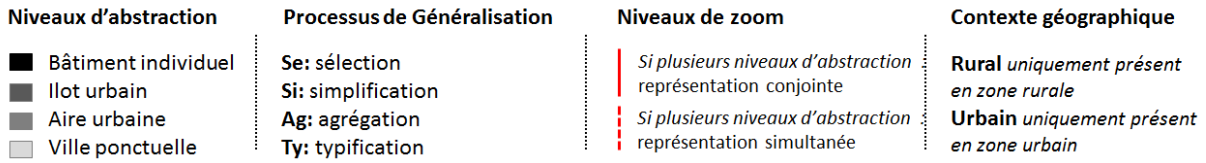


Figure 45. Légende du graphe présentant les résultats d'analyse pour le bâti.

La Figure 46 montre un extrait de ce graphique, pour quelques pyramides et pour la gamme d'échelles allant du 1 : 10 k au 1 : 100 k. Pour clarifier l'utilisation de ce graphique, nous interprétons ici l'exemple de la pyramide NGI Belgique. Sur cette gamme d'échelles, cette pyramide propose trois niveaux de zoom différents. Le premier niveau de zoom représente conjointement des bâtiments individuels, dont la géométrie a été agrégée et typifiée, et des aires urbaines uniquement dans un contexte urbain. Le niveau d'abstraction du bâti individuel disparait au second niveau de zoom, puis des villes ponctuelles apparaissent au-dessus des aires urbaines, formant ainsi une représentation simultanée.

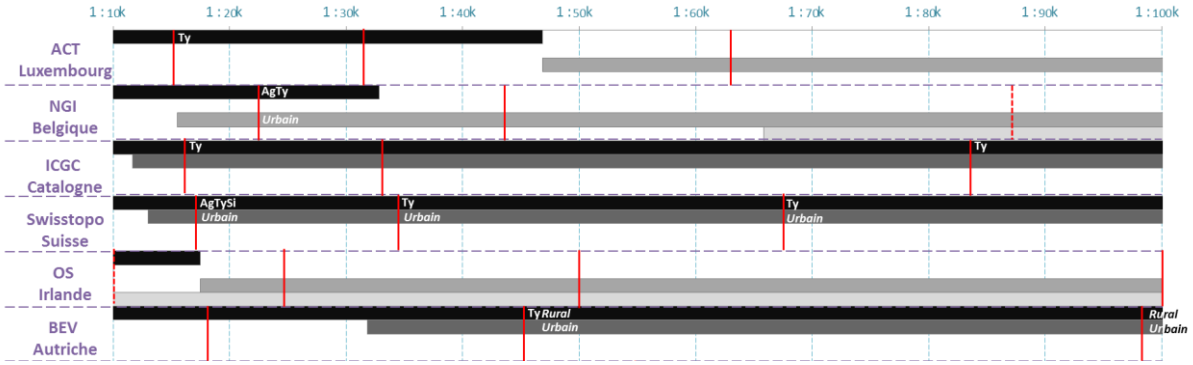


Figure 46. Extrait du graphe représentant les résultats d'analyse de l'évolution de la représentation du bâti en fonction de l'échelle d'affichage dans les cartes multi-échelles étudiées.

Le graphique présentant les résultats obtenus par cette étude, pour les 16 pyramides étudiées sur la plage d'échelles globale, peut être retrouvé dans son intégralité en Annexe C. Le paragraphe suivant présente l'analyse de ses résultats.

B.4.3. Représentation du Bâti en Fonction de l'Échelle d'Affichage

Il est difficile de comparer l'évolution de la représentation du bâti en fonction de l'échelle, entre les différentes pyramides, tant celle-ci est complexe et variable. Pour faciliter cette comparaison, nous nous sommes intéressés d'une part à la plage d'échelles sur laquelle chaque niveau d'abstraction est présent, d'autre part aux enchainements des différents niveaux d'abstraction.

Nous avons donc dans un premier temps discrétisé la gamme d'échelles étudiée en plusieurs intervalles, puis calculé pour chacun le pourcentage de pyramides utilisant chaque niveau d'abstraction. La Figure 47 représente ainsi les tendances d'utilisation des différents niveaux d'abstraction en fonction de l'échelle d'affichage. L'étendue de l'intervalle d'échelle d'utilisation de chaque niveau d'abstraction (largeur de la partie colorée pour chaque ligne sur la Figure 47) montre une forte variabilité entre les différentes pyramides. Si l'on regarde maintenant uniquement les intervalles où plus de 50% des producteurs utilisent chaque niveau d'abstraction (parties rouges sur chaque ligne), nous retrouvons une logique de simplification dans l'enchainement des différents

niveaux d'abstraction : plus l'échelle diminue, plus le niveau d'abstraction utilisé est simple. Ainsi globalement, le bâti individuel est plutôt représenté en le 1 : 1k et le 1 : 50k, l'ilot urbain entre le 1 : 10k et le 1 : 100k, l'aire urbaine entre le 1 : 50k et le 1 :1M et enfin la ville ponctuelle entre le 1 : 250k et le 1 : 5M. Le chevauchement de ces intervalles peut être dû à l'utilisation de représentations mixtes, donc de deux niveaux d'abstraction différents à une même échelle ; ou bien simplement à une forte variabilité entre producteurs sur la relation entre la simplification du contenu cartographique et l'échelle d'affichage.

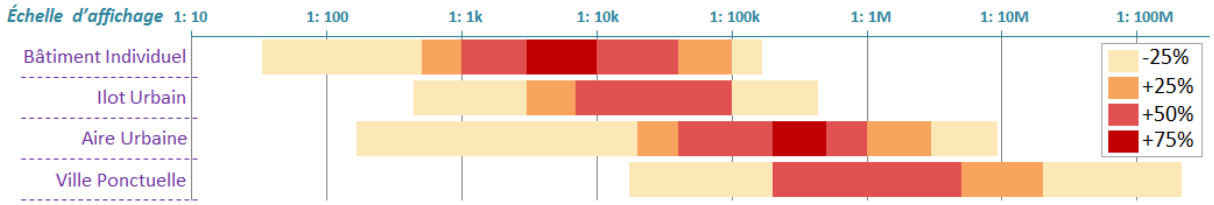


Figure 47. Pourcentage d'utilisation des différents niveaux d'abstraction du bâti en fonction de l'échelle d'affichage, dans les 16 pyramides étudiées.

Nous avons également relevé des exemples de transitions de représentation intéressantes, permettant selon nous de simplifier la navigation entre les niveaux d'abstractions du bâti individuel et de l'aire urbaine. La Figure 48 montre un exemple de **transition par agrégation** : les bâtis individuels sont partiellement agrégés en ilots urbains avant d'être représentés globalement par l'aire urbaine. Nous pourrions créer une transition plus progressive entre deux niveaux existants, en ajoutant plusieurs niveaux de zoom avec des représentations intermédiaires adaptées, produites avec un degré d'agrégation variable.

La Figure 49 montre quant à elle un exemple de **transition par superposition** : on y représente simultanément les bâtiments individuels et l'aire urbaine. On rend ainsi visuellement explicite la relation sémantique entre ces deux niveaux d'abstraction : l'aire urbaine condense l'ensemble des objets bâtis individuels. En revanche, comme dans l'exemple présenté ici, ce type de représentation peut vite poser des problèmes de lisibilité ou bien impliquer une fausse impression de « vide » lorsque les bâtiments disparaissent, donc de faible densité bâtie.

L'utilisation d'une **opération de typification** du bâti peut aussi permettre de créer une simplification plus progressive, échelonnée sur plusieurs échelles, comme illustrée par la pyramide Swisstopo dans la Figure 50. Cette opération préserve les motifs spatiaux, qui peuvent servir de points de repère et permettre à l'utilisateur de se repérer dans la carte après un changement d'échelle. Elle permet également de retarder la nécessité de changer de niveau d'abstraction et conserve donc une représentation détaillée de l'information initiale à plus petite échelle qu'une opération d'agrégation.

Le changement de niveau d'abstraction implique souvent une élimination des points de repères détaillés, comme les bâtiments saillants. Certains producteurs s'autorisent cependant à les conserver, en superposition de la représentation moins détaillée, comme dans la Figure 51. Il est parfois nécessaire de les simplifier pour qu'ils restent lisibles. Nous pensons que **conserver une représentation fidèle des repères visuels**, c'est-à-dire de conserver leurs caractéristiques saillantes tout en s'autorisant à simplifier leurs autres caractéristiques visuelles pour assurer leur lisibilité, peut faciliter la navigation de l'utilisateur.

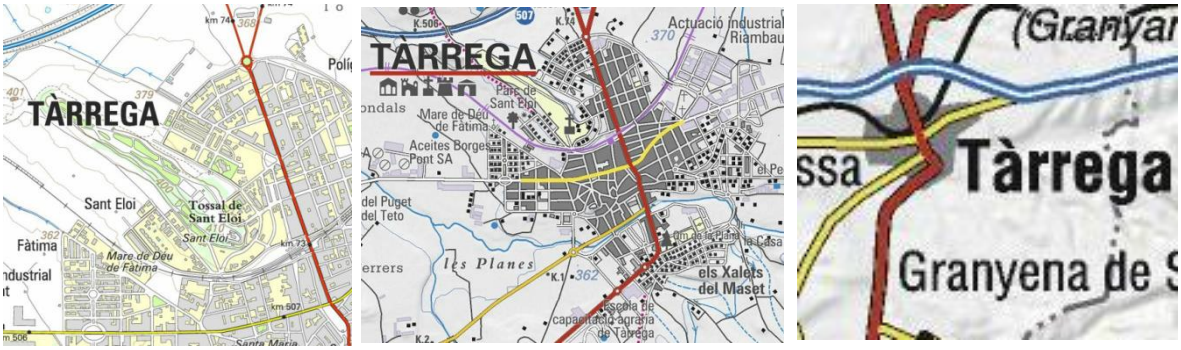


Figure 48. Exemple de transition par agrégation des bâtiments individuels en ilots urbains dans le niveau intermédiaire. Extraits : ICGC Catalogne.

Figure 49. Exemple de transition par superposition : le niveau intermédiaire représente le bâti individuel superposé à l'aire urbaine. Extraits : NLS Finlande.

Figure 50. Conservation des structures spatiales par utilisation d'un algorithme de typification du bâti, dans quatre niveaux de zoom consécutifs. Extraits : Swisstopo.

Figure 51. Exemple de conservation des bâtiments publics (symbolisés en rouge et violet) au-dessus des ilots urbains, entre le 1 : 25k à gauche et le 1 : 50k à droite. Extraits : Scan Express France.

B.4.4. Critères d'Analyse du Routier en Fonction de l'Échelle d'Affichage

L'analyse de la représentation du routier a été initiée dans le cadre d'un projet étudiant [Millet et Samassa, 2016]. Le périmètre de ce projet inclut la définition des typologies d'analyse pour le thème du routier, ainsi que la mesure de ces critères dans les pyramides de notre panel d'étude.

En plus de traiter individuellement l'ensemble des objets routiers, le processus de généralisation doit respecter les caractéristiques principales de l'objet « réseau routier ». Pour cela il doit prendre en compte l'importance de chaque tronçon (classe, longueur, saillance visuelle) mais aussi son rôle dans la connectivité du réseau. Nous étudions donc dans un premier temps la **simplification globale du réseau routier**, en observant les différentes classes d'importance des tronçons routiers (chemins, voies d'accès, routes locales, routes secondaires, routes principales, autoroutes). Nous avons choisi de distinguer trois niveaux d'abstraction différents, basés essentiellement sur les classes de routes représentées :

- représentation des **axes principaux** seulement,
- représentation des **axes principaux et secondaires** seulement,
- représentation de **toutes les routes et chemins**.

Par ailleurs, nous avons étudié plus en détail les ronds-points et les bretelles d'accès, conscients que ces structures complexes présentent un challenge particulier en termes de généralisation. Pour cela nous avons distingué les niveaux d'abstraction suivants, illustrés par la Figure 52 :

- **représentation topographique**, lorsque les tronçons routiers faisant partie de la structure complexe sont représentés principalement selon leurs caractéristiques spatiales : position précise, forme détaillée ;
- **représentation topologique**, lorsque les tronçons routiers faisant partie de la structure complexe sont représentés principalement selon leurs caractéristiques topologiques : position relative et connectivité au reste du réseau, forme générale ;
- **représentation ponctuelle** remplaçant les structures complexes.

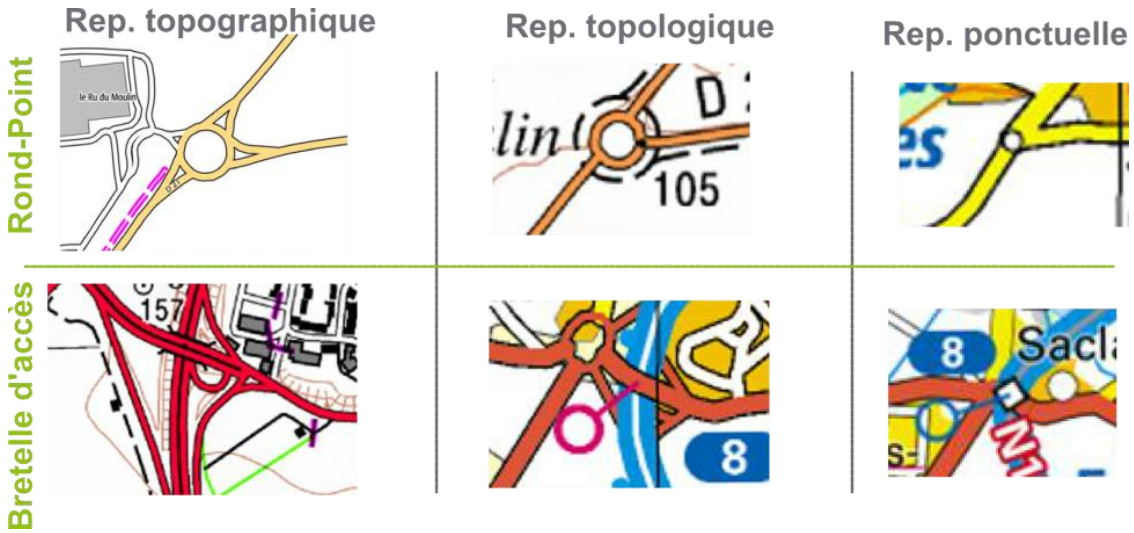


Figure 52. Typologie des niveaux d'abstraction relevés pour les structures complexes telles que les ronds-points ou les bretelles d'accès. Extraits : Scan IGN.

Puis nous avons raffiné cette analyse en relevant l'utilisation des processus de généralisation suivants, illustrés par la Figure 53 :

- **sélection** (ou élimination) : conserve ou élimine les tronçons routiers en se basant sur leurs caractéristiques géométriques ou sémantiques ;
- **simplification** (ou *smoothing*) : supprime les détails de la géométrie pour privilégier sa forme générale ;
- **agrégation** : regroupe plusieurs tronçons routiers en une seule géométrie ;
- **caricature** : élimine des détails et exagère les caractéristiques principales de la géométrie d'un tronçon routier, pour privilégier sa forme globale.
- **typification** : réduit le nombre d'objets tout en préservant l'organisation spatiale d'un groupe d'objets.

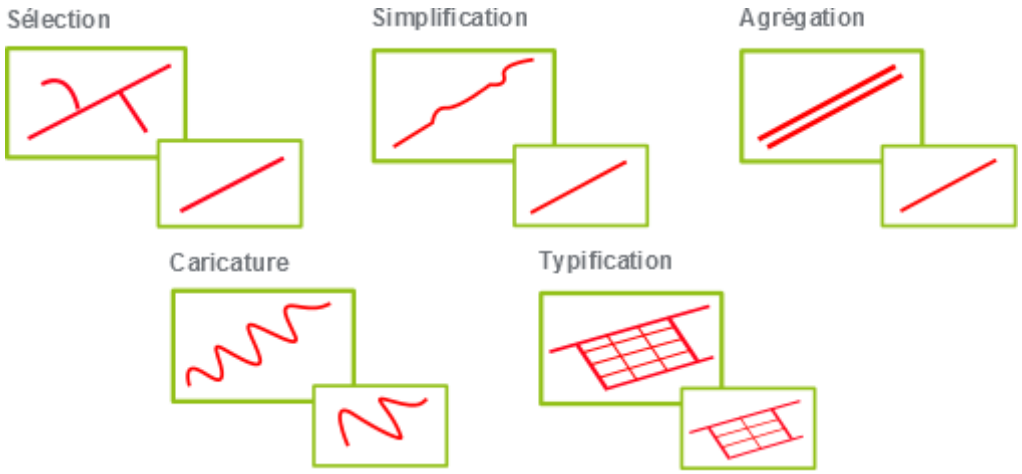


Figure 53. Typologie des processus de généralisation relevés pour le thème du routier.

Comme pour le thème du bâti, nous avons étudié chaque niveau de zoom de chaque pyramide pour relever la présence de ces niveaux d'abstraction et processus de généralisation. Les graphiques détaillés résultant de cette analyse sont présentés en Annexe D.

B.4.5. Représentation du Routier en Fonction de l'Échelle d'Affichage

Pour observer des tendances dans les pratiques des producteurs institutionnels, nous avons observé l'évolution du pourcentage de pyramides utilisant un niveau d'abstraction donné, au fil des échelles d'affichage. Cette évolution est présentée dans la Figure 54 pour les niveaux d'abstraction du réseau routier et dans la Figure 55 pour les niveaux d'abstraction des carrefours complexes.

Concernant l'utilisation des différents niveaux d'abstraction du réseau routier, nous constatons ici que les plages d'utilisation (sans distinction d'importance) sont relativement étendues, ce qui montre comme pour le bâti la diversité de relation utilisée entre échelle d'affichage et simplification du contenu dans les différentes pyramides étudiées. Néanmoins, nous constatons que les plages d'utilisation supérieures à 50% (parties rouges sur chaque ligne) se chevauchent relativement moins que pour le bâti. On peut donc supposer ici que la généralisation du réseau routier est plus consensuelle que celle du bâti. Cependant, précisons ici que les niveaux d'abstraction que nous distinguons pour le réseau routier ne peuvent logiquement pas coexister à un même niveau de zoom par définition. Nous n'observons donc pas de représentation mixte pour le réseau routier, ce qui peut aussi expliquer cette diminution des chevauchements.

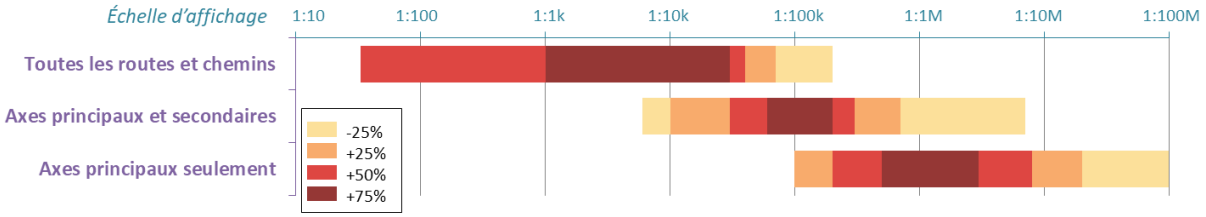


Figure 54. Pourcentage d'utilisation des différents niveaux d'abstraction du réseau routier en fonction de l'échelle d'affichage, dans les 16 pyramides étudiées.

Concernant la représentation des carrefours complexes cette fois, notre premier constat est que les représentations topologiques ou ponctuelles sont relativement peu utilisées dans les pyramides que nous avons étudiées. Notons ici que la quantité et la complexité des carrefours complexes existants dans le réseau routier est variable entre les différents pays et peut expliquer cette faible utilisation. Par exemple, le réseau routier des Etats-Unis est particulièrement rectiligne et les carrefours sont de simples croisements, alors que le réseau routier français contient de nombreux ronds-points et bretelles d'accès complexes.

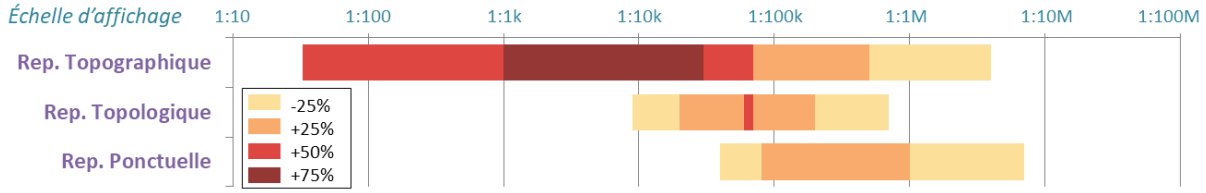


Figure 55. Pourcentage d'utilisation des différents niveaux d'abstraction des carrefours complexes en fonction de l'échelle d'affichage, dans les 16 pyramides étudiées.

La plupart du temps, les carrefours complexes sont donc simplement supprimés, sans étape intermédiaire. En observant les pyramides étudiées, nous avons eu le sentiment que la navigation était relativement plus fluide lorsque des représentations topologiques et/ou ponctuelles étaient utilisées. Les **représentations topologiques permettent de garder une information plus détaillée sur la connectivité du réseau à moyenne échelle**, ce qui peut donc faciliter la réalisation de tâches cartographiques à moyenne échelle, comme le suivi d'itinéraire, lorsque la zone géographique considérée est étendue par exemple. Les carrefours complexes (ronds-points, bretelles d'accès, etc.) étant des structures particulièrement saillantes du réseau routier, **indiquer leur position par un point après simplification du réseau routier peut permettre à l'utilisateur de conserver ses points de repère** dans la carte et faciliter sa navigation multi-échelle. Nous pensons donc qu'**utiliser ces types de représentations pour créer des représentations intermédiaires permettrait de fluidifier la navigation dans les cartes multi-échelles existantes.**

Concernant les processus de généralisation utilisés, nous avons constaté qu'il était plus difficile d'identifier la présence des processus de généralisation du réseau routier que du bâti, excepté pour les opérations de sélection. Notons donc que nos graphiques ne révèlent que de manière non exhaustive la présence des processus utilisés dans les pyramides étudiées. Par ailleurs, cette analyse ne nous a pas semblée pertinente pour la représentation des carrefours complexes en particulier, qui sont déjà pris en compte dans le réseau routier en général. Nous ne l'avons donc réalisée et reportée en Annexe D que pour la représentation du réseau routier.

Les processus de généralisation que nous avons identifiés sont généralement utilisés dans les pyramides institutionnelles. Nous n'avons trouvé que très peu d'exemples de caricature et de typification, respectivement utilisés pour la simplification des routes sinueuses (ACT Luxembourg, ICGC Catalogne, IGN France, NGI Belgique, Swisstopo) et des zones urbaines denses aux quadrillages réguliers (ICGC Catalogne, IGN Espagne). Concernant le processus d'agrégation, nous avons relevé quelques utilisations pour simplifier des routes à plusieurs voies. Néanmoins, il s'agit le plus souvent d'un changement de symbolisation et non pas d'une modification des données géométriques. Les processus de simplification que nous avons identifiés permettent de simplifier la géométrie des routes, en supprimant les virages trop petits pour être lisibles par exemple. Enfin, le processus de sélection est le plus couramment utilisé pour la généralisation du réseau routier dans les pyramides étudiées, de manière globale sur des critères d'importance ou de connectivité du réseau, mais aussi de manière plus locale pour résoudre des conflits spatiaux. **Ces opérations de sélection permettent de créer des étapes intermédiaires dans la simplification globale du réseau routier et permettent à notre sens une navigation multi-échelle plus fluide dans une carte multi-échelle.**

Les pyramides non institutionnelles (Bing Maps, Google Maps, OpenStreetMap) n'appliquent quasiment pas de processus de généralisation. En revanche, la symbolisation du réseau routier permet elle-même d'améliorer la lisibilité du contenu cartographique à petite échelle. Ainsi, les routes locales paraissent grises lorsque leur liseré blanc n'est plus lisible, comme le montre la Figure 56, diminuant la complexité visuelle de la carte et facilitant sa lecture. Nous pensons que **cette stratégie est intéressante pour la navigation multi-échelle**, car elle permet d'assurer la cohérence géométrique du réseau routier à différentes échelles (puisque les tronçons routiers ne sont pas généralisés), de fournir une représentation relativement lisible à moyenne et petite échelle et surtout d'indiquer à l'utilisateur qu'une information plus détaillée est disponible en zoomant dans la pyramide. Cette stratégie n'est par contre pas suffisante lorsque le saut d'échelles est très important, car sans changement de niveau d'abstraction, l'information est soit trop détaillée pour être lisible, soit trop simplifiée pour être utile. **Il serait donc intéressant de réfléchir à l'utilisation de cette stratégie, en complément des processus de généralisation habituellement utilisés.**

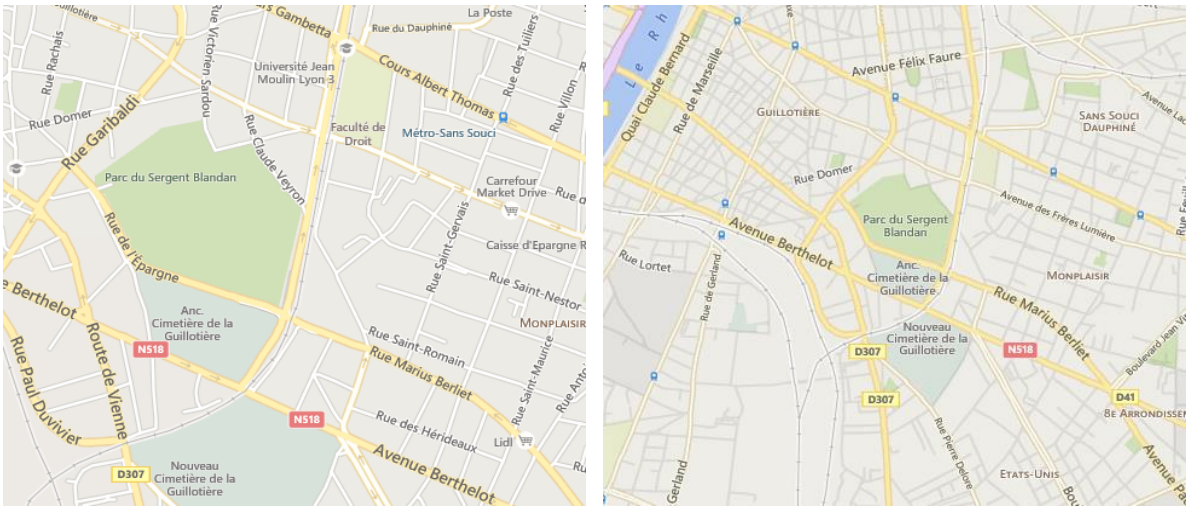


Figure 56. Évolution de la symbolisation des routes locales dans les pyramides non institutionnelles : les routes paraissent grises lorsque leur liseré blanc n'est plus distinguable, ce qui facilite la lecture de la carte.

Enfin, nous avons déjà mentionné que le changement de symbolisation d'une même route entre deux échelles était selon nous une source de difficulté potentielle pour l'utilisateur. Nous avons constaté dans cette analyse plus approfondie que ce **changement de symbolisation n'était pas toujours lié à une hétérogénéité de légende.** Lorsque la classification du réseau routier sur laquelle se base la symbolisation des routes est simplifiée, on diminue le nombre de classes représentées, soit en supprimant les objets des classes les plus détaillées, soit en agrégeant plusieurs classes. Dans ce cas, il peut arriver qu'un groupe de routes (secondaires en jaune par exemple) soient reclassées en routes de moindre importance (locales en blanc par exemple). Ce changement de symbolisation peut parfois être justifié pour garantir la lisibilité ou l'esthétisme de la carte. Néanmoins, nous sommes convaincus que ces changements visuels, sur des éléments aussi structurants que le réseau routier, peut avoir un impact négatif sur la fluidité de navigation. **Nous supposons donc ici qu'assurer la cohérence de représentation des routes au fil des échelles permettrait d'améliorer la fluidité de navigation.**

L'étude de l'évolution de la représentation du contenu cartographique en fonction de l'échelle d'affichage nous a permis d'identifier des **tendances globales mais aussi des stratégies originales qui nous semblent intéressantes pour faciliter les transitions entre deux représentations utilisant des niveaux d'abstraction différents**. Pour confirmer nos impressions personnelles quant à ces pistes d'amélioration potentielle, nous réaliserons un **test utilisateurs** dans la suite de cette thèse.

Au cours de notre étude des pyramides existantes, nous avons justifié certains facteurs de difficulté potentielle par la **variation de complexité visuelle** qu'ils pouvaient impliquer. Pour approfondir cette réflexion, nous caractérisons maintenant cette variation dans les pyramides étudiées, à l'aide de **mesures de clutter**.

B.5. Variation de la Complexité Visuelle du Contenu Cartographique en Fonction de l'Échelle d'Affichage

Évaluer la complexité d'une carte permet d'estimer la **charge cognitive** relative à son utilisation [Harper et al., 2009], c'est-à-dire l'ensemble des efforts de mémorisation et d'analyse que l'utilisateur doit fournir pour comprendre ou utiliser son contenu [Sweller et al., 2011]. Cette complexité est donc directement liée à l'efficacité de la carte pour une tâche donnée [MacEachren 1982]. **En plus de contrôler cette complexité à chaque niveau de zoom d'une carte multi-échelle, nous souhaitons évaluer sa variation en fonction de l'échelle d'affichage dans les différentes pyramides étudiées.**

Après avoir présenté les méthodes d'évaluation de la complexité visuelle (§B.5.1) et en particulier les mesures de clutter que nous utiliserons (§B.5.2), nous présentons notre protocole d'analyse et les mesures de notre étude (§B.5.3). Nous analysons ensuite les résultats obtenus pour évaluer la pertinence et la sensibilité de ces mesures (§B.5.4), puis observons les variations de complexité visuelle existant dans les pyramides étudiées (§B.5.5). Cette partie reprend des résultats publiés dans [Dumont et al., 2016a].

B.5.1. Définition et Évaluation de la Complexité d'une Carte

De nombreux chercheurs en cartographie mais aussi en informatique ont étudié la complexité des représentations graphiques, en appliquant différents points de vue et donc en utilisant différents

indicateurs. Néanmoins, la plupart des définitions de la **complexité d'une carte** en particulier s'accordent sur la distinction des facteurs suivants [MacEachren 1982; Fairbairn 2006; Jégou et Deblonde, 2012; Touya et al., 2016] :

- la **complexité visuelle** (ou graphique), qui évolue en fonction de la quantité d'informations et de l'organisation du contenu de la carte ;
- la **complexité sémiologique**, liée à la compréhension du sens sémantique des symboles de la carte ;
- la **complexité intellectuelle** (ou cognitive), qui couvre la compréhension des structures spatiales et du message implicite de la carte.

Nous observons que la complexité sémiologique et la complexité intellectuelle dépendent en partie des capacités et de l'expérience de l'utilisateur (interprétation de la carte, connaissance des symboles utilisés etc.). En pratique, les cartographes ont donc un plus grand contrôle potentiel sur la complexité visuelle que sur les autres facteurs [MacEachren 1982]. **Dans nos travaux, nous nous concentrerons donc essentiellement sur la complexité visuelle.**

Plusieurs facteurs de la complexité visuelle ont été identifiés par [Miniukovich et De Angeli, 2014 ; Harrie et al., 2015] :

- la **quantité d'information**, déterminée par la quantité d'objets représentés dans la carte, mais aussi la complexité de leur forme et des couleurs utilisées pour les représenter ;
- l'**organisation de l'information**, définie comme la distribution spatiale et l'organisation ou la désorganisation des objets dans la carte ;
- la **discrimination de l'information**, estimée en comparant les spécifications graphiques aux limites de perception visuelle de l'être humain.

Bien qu'aucune méthode existante ne couvre totalement la complexité visuelle d'une carte, plusieurs méthodes proposent d'évaluer un ou plusieurs de ces facteurs. Les mesures **d'entropie** proposent par exemple d'évaluer la quantité et l'organisation de l'information nécessaires pour transmettre le message de la carte, en appliquant la théorie de l'information de [Shannon et Weaver, 1949]. Des mesures de **lisibilité** de la carte proposent par ailleurs d'évaluer la discrimination de l'information, en vérifiant que la symbolisation et la distribution spatiale des objets respectent les limites de perception visuelle de l'être humain. Le concept de **clutter** [Rosenholtz et al., 2007], importé du domaine de la vision par ordinateur, fait quant à lui référence à une complexité excessive dans une représentation graphique. Le terme « **mesure de clutter** » désigne alors une méthode d'évaluation de la complexité visuelle, dont la mesure n'est cependant pertinente que lorsque la carte présente un clutter visuel. **Dans nos travaux, nous choisissons d'utiliser des mesures de clutter pour estimer la complexité d'une carte, car ces méthodes semblent couvrir les autres méthodes d'évaluation existantes.**

B.5.2. Mesures de Clutter : Méthodes Existantes et Pertinence

De nombreuses mesures de clutter existent [Moacdieh et Sarter, 2014]. Différentes méthodes proposent d'évaluer un ou plusieurs facteurs de la complexité visuelle pour mesurer le clutter, en se basant souvent sur des méthodes d'analyse d'images, pour des représentations graphiques en général [Rosenholtz et al., 2007 ; Bravo et Farid, 2008; Harper et al., 2009; Purchase et al., 2012 ; Miniukovich et De Angeli, 2014; Moacdieh et Sarter, 2014 pp. 6-17], ou des cartes en particulier [Jégou et Deblonde, 2012; Rosenholtz et al., 2007; Touya et al., 2015]. Les mesures de clutter

évaluent la complexité visuelle d'une représentation graphique dans son ensemble, en donnant une unique valeur globale, ou bien plus localement, en indiquant les variations de clutter dans l'image, voire les deux. Quelques travaux proposent aussi des méthodes basées sur l'analyse des données vectorielles [MacEachren 1982 ; Fairbairn 2006; Harrie et al., 2015], en évaluant globalement la quantité d'objets, la longueur des objets linéaires, le nombre de sommets des géométries ou bien plus localement le nombre d'objets du voisinage [Jansen and van Kreveld, 1998].

La corrélation entre ces méthodes d'évaluation (basées image ou vecteur) et la complexité visuelle perçue par l'utilisateur a été évaluée pour des images [Bravo et Farid, 2008; Moacdieh et Sarter, 2014 pp. 17-20] et pour des cartes [Rosenholtz et al., 2007 ; Harrie et al., 2015], en utilisant :

- une **évaluation subjective**, en demandant aux participants de noter ou de classer des représentations graphiques selon leur complexité visuelle ;
- ou bien une expérience où l'on **mesure les performances** des participants pour une tâche donnée, par exemple le temps de réalisation de la tâche et le nombre de fautes commises.

Dans la majorité des cas, une augmentation du clutter est liée à une détérioration des performances de l'utilisateur pour une tâche donnée, que l'on sait liée à la complexité de la carte [MacEachren 1982]. Bien que ces résultats appuient la pertinence des mesures de clutter pour évaluer la complexité de la carte, il est difficile de percevoir la part de cette complexité visuelle couverte par chaque mesure. Des travaux soulèvent donc l'intérêt de combiner plusieurs méthodes pour évaluer au mieux cette complexité [Touya et al., 2015 ; Touya et al., 2016].

Dans notre cas, puisque nous ne disposons pas des données vectorielles à partir desquelles les pyramides étudiées sont construites, nous adopterons des méthodes basées sur l'analyse d'images. Pour couvrir au mieux la complexité visuelle de la carte, nous utiliserons plusieurs méthodes différentes**,** présentées dans le paragraphe suivant**.** Nous reconnaissons néanmoins le potentiel des méthodes analysant les données vectorielles et souhaitons les appliquer dans la suite de nos travaux.

Des travaux montrent la cohérence de ces mesures avec la différence de complexité visuelle perçue par l'utilisateur, entre des cartes à même échelle au niveau d'abstraction différent [Brychtova et al., 2016 ; Schnur et al., 2017] ou entre différents types de géovisualisation (cartes, orthophotos) [Brychtova et al., 2016]. D'autres travaux récents ont aussi utilisé des mesures de clutter dans des cartes multi-échelles. Certains travaux montrent ainsi leur intérêt pour l'évaluation de la généralisation cartographique [Touya et al., 2015 ; Brychtova et al., 2016]. Ces études appuient l'intérêt des mesures de clutter en général pour notre problématique, tout en relevant leurs limites que nous essaierons d'identifier pour nos mesures dans le paragraphe §B.5.4.

B.5.3. Protocole d'Analyse et Mesures de Clutter Utilisées

Pour mener cette analyse, nous avons réalisé **une capture d'écran sur chaque niveau de zoom de chaque pyramide de notre panel d'étude, de même taille et de même résolution**. Nous avons donc relevé 238 échantillons, à savoir 16 pyramides multipliées par le nombre de niveaux de zoom disponibles. Pour chacune de ces pyramides, tous les échantillons font la même taille en pixels et sont centrés sur la même zone géographique, pour permettre une comparaison pertinente de leur mesure de clutter. L'ensemble de ces échantillons est disponible en Annexe E.

Pour chaque échantillon, nous avons calculé trois mesures de clutter différentes, dont nous

décrivons le principe dans la suite de cette partie. Puis, pour observer la différence de variation du clutter en fonction de l'échelle d'affichage dans chacune de ces pyramides, nous avons reporté ces mesures sur un graphe, en fonction du niveau de zoom correspondant dans la numérotation du standard WMTS, comme illustré par la Figure 57. Les graphiques représentant les résultats des trois mesures de clutter pour l'ensemble des 16 pyramides étudiées sont disponibles en Annexe E.

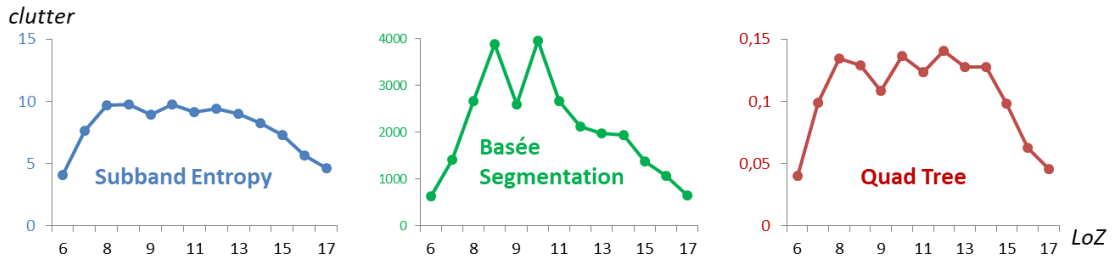


Figure 57. Évolution des valeurs de clutter pour les trois mesures utilisées, en fonction du niveau de zoom correspondant (LoZ), pour la pyramide Scan Express de l'IGN.

La première méthode que nous avons utilisée, dite de ***subband entropy*** [Rosenholtz et al., 2007], est similaire à la compression utilisée pour le format image JPEG. Après avoir décomposé l'image en ondelettes, cette méthode mesure la désorganisation des couleurs en calculant une somme pondérée de la luminance et de la chrominance de chacune des sous-bandes, dans l'espace de couleur CIELab. Elle propose donc une valeur de clutter globale, pour l'image entière. Le principe de cette mesure a été validé par comparaison avec les résultats d'un test utilisateurs [Rosenholtz et al., 2007]. La version de cette mesure que nous utilisons a été adaptée de deux travaux existants [Rosenholtz et al., 2007 ; Jégou et Deblonde, 2012].

La seconde méthode, dite ***basée segmentation*** [Bravo et Farid, 2008], exécute un algorithme de segmentation efficace [Felzenszwalb et Huttenlocher, 2004] sur l'image analysée. Les pixels de l'image sont alors regroupés en régions, selon leurs caractéristiques visuelles. La valeur de clutter globale est alors donnée par le nombre d'objets résultant de cette segmentation, mais une représentation graphique permet aussi d'avoir une évaluation locale du clutter, comme illustré à droite de la Figure 58. Cette méthode a été validée sur des images par un test utilisateurs [Bravo et Farid, 2008]. Ses résultats sont cohérents avec la méthode de *subband entropy* [Rosenholtz et al., 2007] et donc considérés pertinents sur des cartes également.

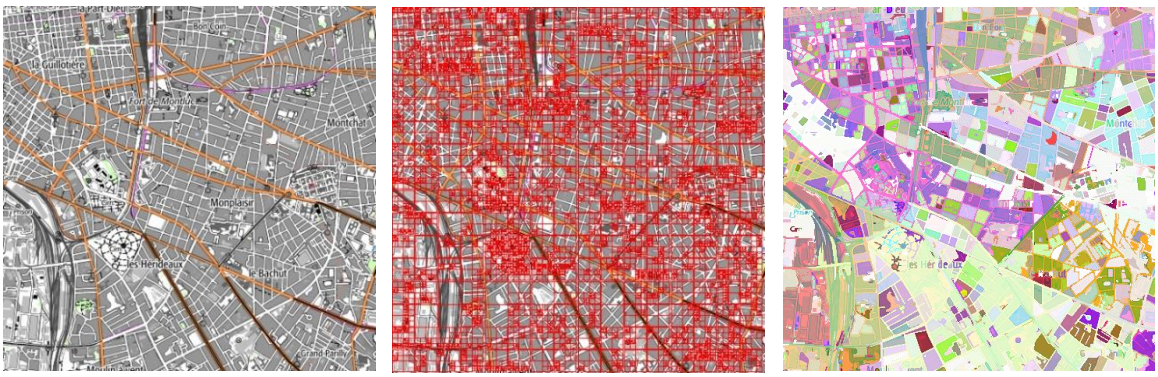


Figure 58. Représentation des résultats graphiques des mesures de clutter dans l'image de gauche extraite de la pyramide Scan IGN, respectivement avec les mesures dite par quadtree (au milieu) et basée segmentation (à droite).

La dernière méthode que nous avons utilisée, dite par ***quadtree*** [Jégou et Deblonde, 2012], convertit l'image évaluée en niveaux de gris puis la découpe progressivement selon une grille régulière. Pour chaque cellule de cette grille, on observe les valeurs de ses pixels : si la différence entre la valeur maximum et la valeur minimum est plus grande que le seuil choisi, la cellule est coupée en quatre sous-cellules de même taille, et ainsi de suite jusqu'à ce que toutes les cellules soient considérées homogènes. Cette méthode fournit finalement une valeur de clutter globale, le nombre total de cellules considérées homogènes, mais aussi une évaluation locale par la répartition spatiale de ces cellules finales, comme illustré au milieu de la Figure 58. Bien qu'elle traite les images en niveaux de gris et qu'elle soit dépendante de ce seuil critique, nous avons choisi cette méthode car elle a été développée spécifiquement pour des cartes et montrée cohérente avec la complexité visuelle perçue par des experts cartographes [Jégou et Deblonde, 2012]. Nous avons observé une faible variation des mesures de clutter dans nos images en fonction de ce seuil critique. Nous avons donc choisi un seuil moyen, pour lequel nous étions capables de distinguer des variations locales dans la densité des cellules découpées, c'est-à-dire des variations locales de complexité visuelle.

Ces trois méthodes ont été implémentées dans le cadre d'un projet étudiant, visant à établir le potentiel des mesures de clutter pour l'évaluation de la généralisation cartographique [Touya et al., 2015]. Ces méthodes ont alors été considérées cohérentes entre elles et avec les différences de complexité perçue par les étudiants et par nous-même. **Ce projet a aussi montré des différences de sensibilité entre les méthodes étudiées, nous encourageant à vérifier cette sensibilité dans notre analyse, notamment pour identifier les facteurs de représentation qui influencent potentiellement le clutter.**

B.5.4. Sensibilité et Cohérence des Différentes Mesures de Clutter Utilisées

Nous observons dans cette partie la cohérence des trois mesures de clutter entre elles, ainsi que leurs différences de sensibilité. Comme nous l'avons précédemment mentionné, les différentes mesures de clutter utilisées n'évaluent pas exactement les mêmes facteurs de complexité visuelle, n'opèrent pas les mêmes calculs sur les images étudiées et ne présentent donc pas les mêmes gammes de valeurs, comme le montre la Figure 57. Nous ne comparons donc pas ici les valeurs obtenues, mais bien la forme des courbes en traçant les variations de ces valeurs en fonction de l'échelle d'affichage. La Figure 59 représente ainsi les trois courbes de la Figure 57, en coïncidence verticale, sans signification de l'axe des ordonnées.

Entre chaque couple de niveaux de zoom consécutifs, on constate qu'en général les trois mesures présentent un même sens de variation, excepté pour l'exemple mis en évidence en jaune. La méthode basée segmentation indique ici une diminution de clutter alors que les deux autres mesures indiquent une augmentation. En observant ces deux niveaux de zoom, qui sont illustrés dans la Figure 60 (LoZ 12 et 11), nous avons personnellement l'impression que la complexité visuelle diminue. Dans le niveau 11, le contenu est généralisé, la quantité d'information diminue et la taille des toponymes augmente. Ici nous pensons que la méthode basée segmentation est particulièrement sensible aux contours des toponymes (en blanc pour les villes et en noir pour les axes routiers). Ces contours impliquent ici une segmentation plus dense, ils sont donc considérés visuellement complexes alors qu'ils permettent une meilleure lisibilité. De manière générale, la méthode basée segmentation présente une amplitude de valeurs plus importantes que les deux autres mesures, donc une sensibilité plus importante. Nous considérons néanmoins que ces quelques différences sont négligeables au niveau d'analyse de notre étude : cette variabilité peut dépendre du

paramétrage de nos mesures, comme le choix du seuil de la méthode par *quadtree* par exemple. **Nous considérons donc que ces trois mesures sont globalement cohérentes entre elles.**

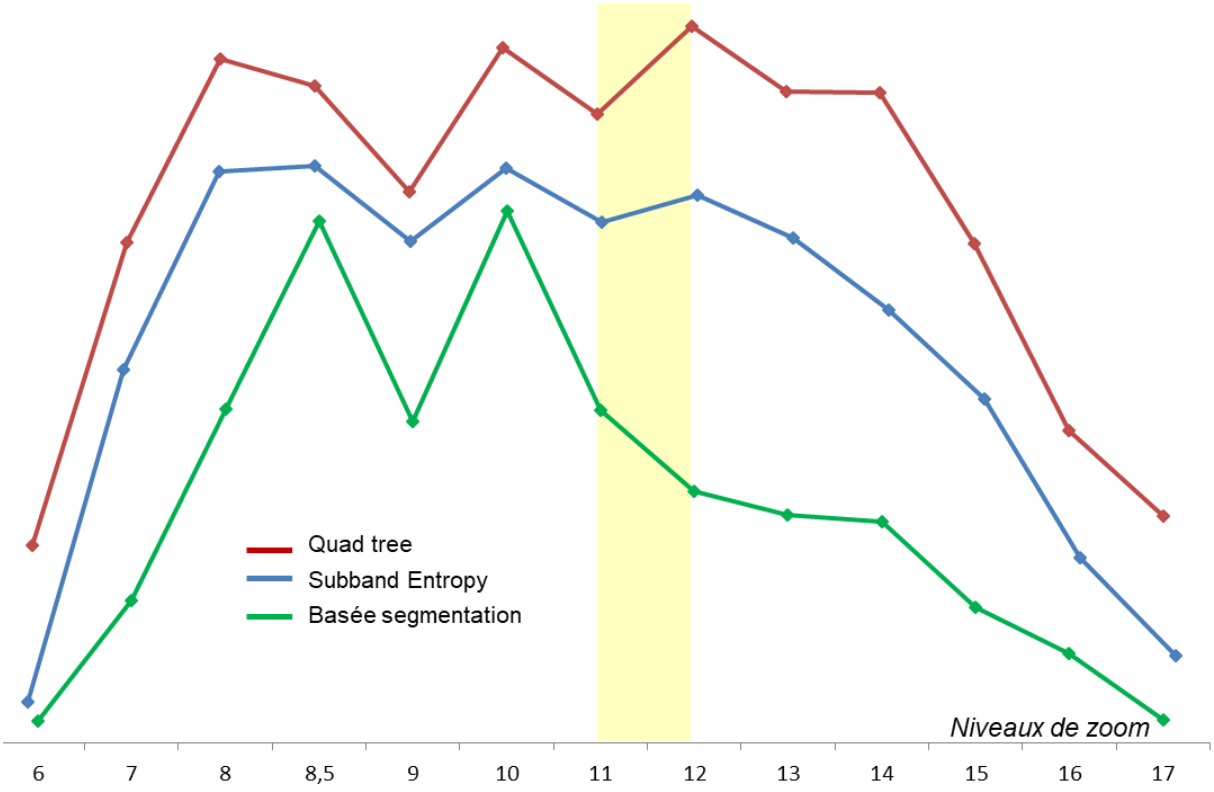


Figure 59. Comparaison de la forme des courbes obtenues pour les trois mesures de clutter de notre étude, pour une même pyramide, ici Scan Express de l'IGN, les différences de sens de variations sont mises en évidence en jaune. Les différentes mesures n'ayant pas la même gamme de valeurs, l'axe des ordonnées n'est ici pas significatif. Suite à l'utilisation de deux niveaux de zoom dans la plupart des géoportails étudiées, des points sont associés au niveau de zoom 8,5.

Dans la Figure 60, nous présentons cinq niveaux de zoom consécutifs de la pyramide Scan Express de l'IGN, avec un extrait des résultats correspondants pour la mesure de clutter par *subband entropy*. Comme expliqué dans le paragraphe §B.3.3, un même contenu cartographique est utilisé à deux niveaux de zoom consécutifs (11-10 et 9-8). En zoomant en arrière du niveau 12 au niveau 11, l'échelle diminue, la carte représente alors une plus grande zone géographique mais le contenu cartographique est simplifié : la complexité nous semble diminuer. Entre les niveaux 11 et 10, l'échelle diminue aussi mais le contenu cartographique n'est pas modifié : plus d'informations sont affichées et les symboles sont plus petits, la complexité nous semble donc augmenter. Le même schéma est ensuite répété avec les niveaux 9 et 8, correspondant bien aux montées et descentes dans les courbes de variation du clutter. Les résultats des deux autres mesures de clutter par quadtree et basée segmentation sont similaires à ceux présentés dans la Figure 60 pour la mesure subband entropy. **D'une manière générale, les résultats de ces trois mesures sont donc cohérents avec nos perceptions de la variation de complexité visuelle.**

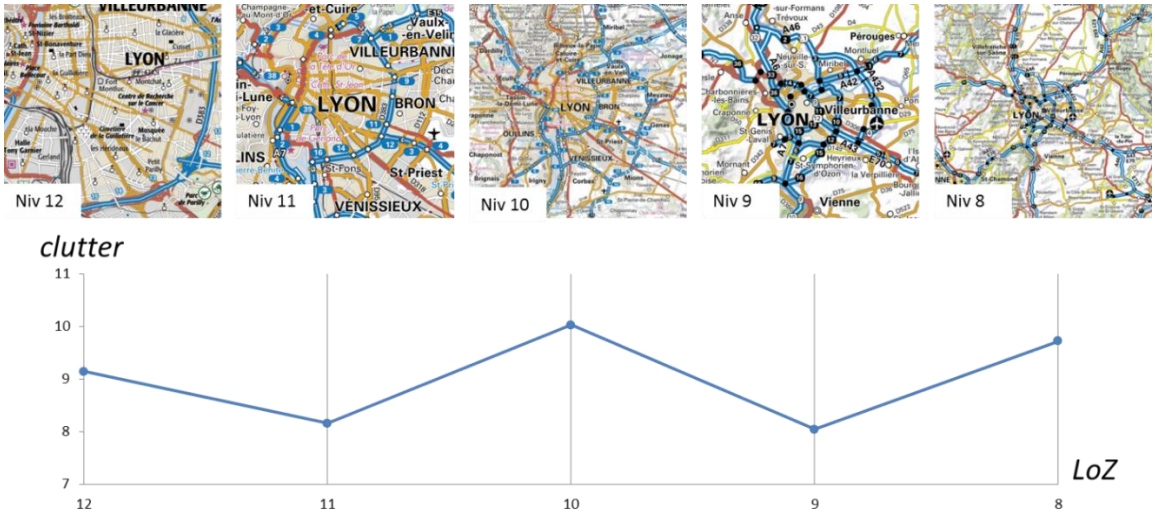


Figure 60. Évolution de la mesure de clutter par *subband entropy* pour la pyramide Scan Express de l'IGN, pour cinq niveaux de zoom consécutifs (LoZ 12 à 8). L'axe des niveaux de zoom est ici inversé par rapport aux autres graphiques de cette partie, mais nous semble ici plus intuitif pour appréhender la variation de complexité qu'implique la répétition de contenu cartographique.

Par ailleurs, nous avons évalué la sensibilité de ces mesures à la palette de couleurs utilisée. Pour cela, nous avons appliqué ces méthodes sur trois versions différentes de la pyramide Scan Express illustrées par la Figure 61, chacune utilisant une palette différente : classique, standard ou en niveaux de gris [Lafay et al., 2015]. Excepté la couleur utilisée, la symbolisation des données est identique pour les trois versions. Les méthodes de *subband entropy* et par *quadtree* ne présentent aucune différence selon la palette, ce qui s'explique par leur définition qui prend seulement en compte les contrastes entre couleurs, qui ne varient quasiment pas entre les trois palettes étudiées. La méthode *basée segmentation* présente quant à elle de légères variations, présentées par la Figure 61. Les sens de variation et amplitudes de valeurs semblent identiques entre les trois palettes. Seules les plages de valeurs semblent plus importantes pour la palette classique, qui utilise des couleurs plus vives que la palette standard, cette dernière étant spécifiquement destinée à servir de fond cartographique. **Nous concluons de cette comparaison que les trois mesures de clutter utilisées ne sont pas très sensibles à la palette de couleurs, dans la mesure où celle-ci reste bien équilibrée**, c'est-à-dire que les contrastes soient suffisants pour que les couleurs restent discernables. Pour mieux estimer la variation de couleurs en fonction de l'échelle d'affichage, il faudrait utiliser d'autres méthodes d'évaluation du clutter, telles que celles présentées dans [Purchase et al., 2012].

La représentation graphique des méthodes par *quadtree* et *basée segmentation* peut donner une indication plus précise des éléments qui influencent le clutter. La Figure 62 montre ainsi le résultat de la méthode *quadtree* pour un échantillon. Nous constatons une forte concentration des celles sur les lignes en pointillés (allées du cimetière) et les toponymes, donc considérés par la mesure comme sources de complexité visuelle. Ces éléments très saillants ou porteurs de sens sont cependant susceptibles d'être utilisés comme des points de repère par l'utilisateur et peuvent donc faciliter une tâche de navigation. A ce sujet, les travaux de [Schnur et al., 2017] testent des versions floues de cartes topographiques et montrent que la complexité visuelle perçue augmente lorsque les toponymes sont moins lisibles. **Nous identifions donc ici la limite majeure des mesures de clutter, qui si elles évaluent bien la complexité visuelle, ne prennent pas en compte la complexité intellectuelle du processus de lecture de carte.**

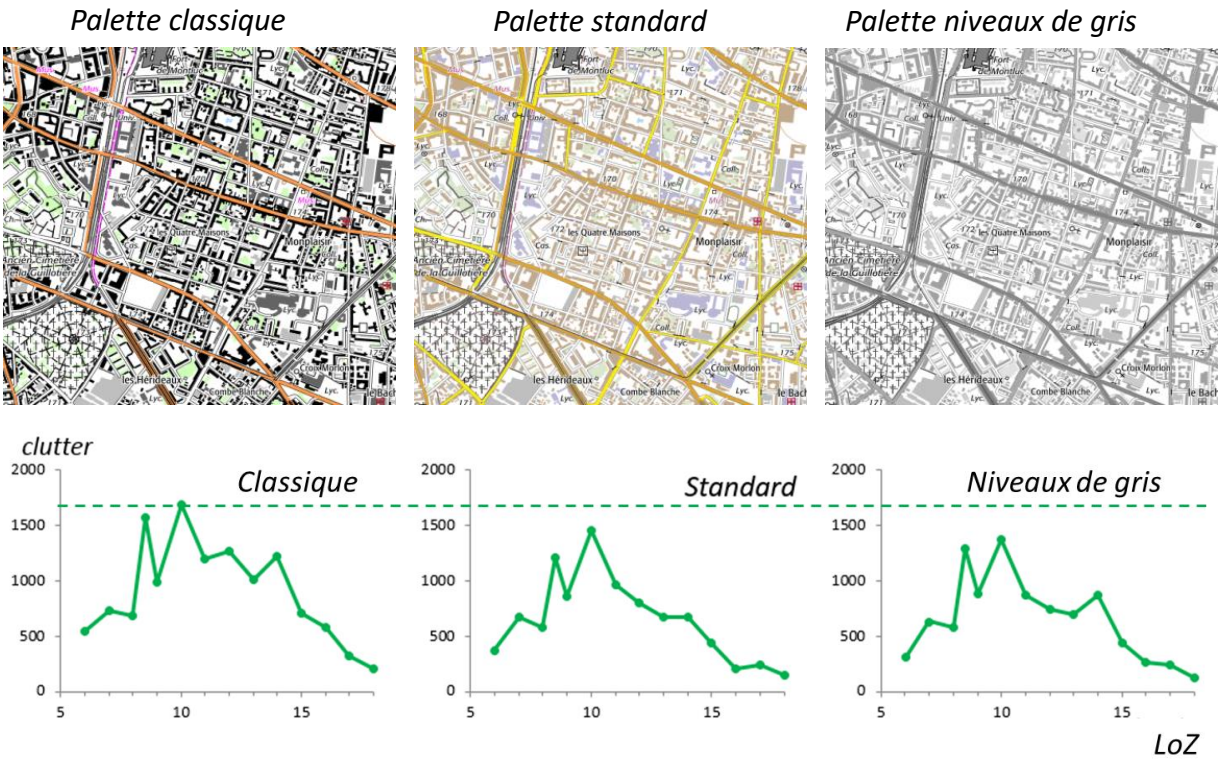


Figure 61. Évolution du clutter en fonction du niveau de zoom (LoZ), mesurée par la méthode basée segmentation pour trois versions de la pyramide Scan Express utilisant chacune une palette différente : classique, standard ou en niveaux de gris [Lafay et al., 2015].

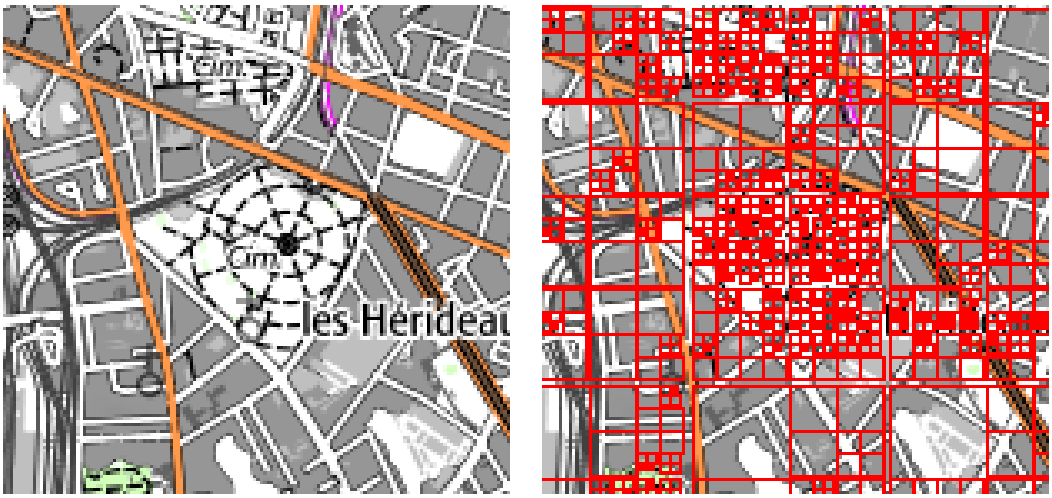


Figure 62. Représentation graphique du résultat de la méthode par *quadtree* (à droite) pour un échantillon de la pyramide Scan IGN (à gauche).

B.5.5. Variations du Clutter en Fonction de l'Échelle d'Affichage

Nous observons maintenant les variations des mesures de clutter constatées entre les différents niveaux de zoom d'une même pyramide. Nous considérons ici qu'une variation importante de complexité visuelle sur l'ensemble d'une pyramide et en particulier entre deux niveaux de zoom consécutifs peut perturber l'utilisateur. Nous supposons qu'une différence de clutter suffisante peut signaler ces variations importantes.

D'une part, nous avons donc observé les variations « locales » des mesures de clutter dans chaque pyramide, c'est-à-dire les écarts de clutter entre deux niveaux de zoom consécutifs, comme illustré par la Figure 63. Nous avons ensuite calculé la somme de ces variations locales, pour chaque pyramide.

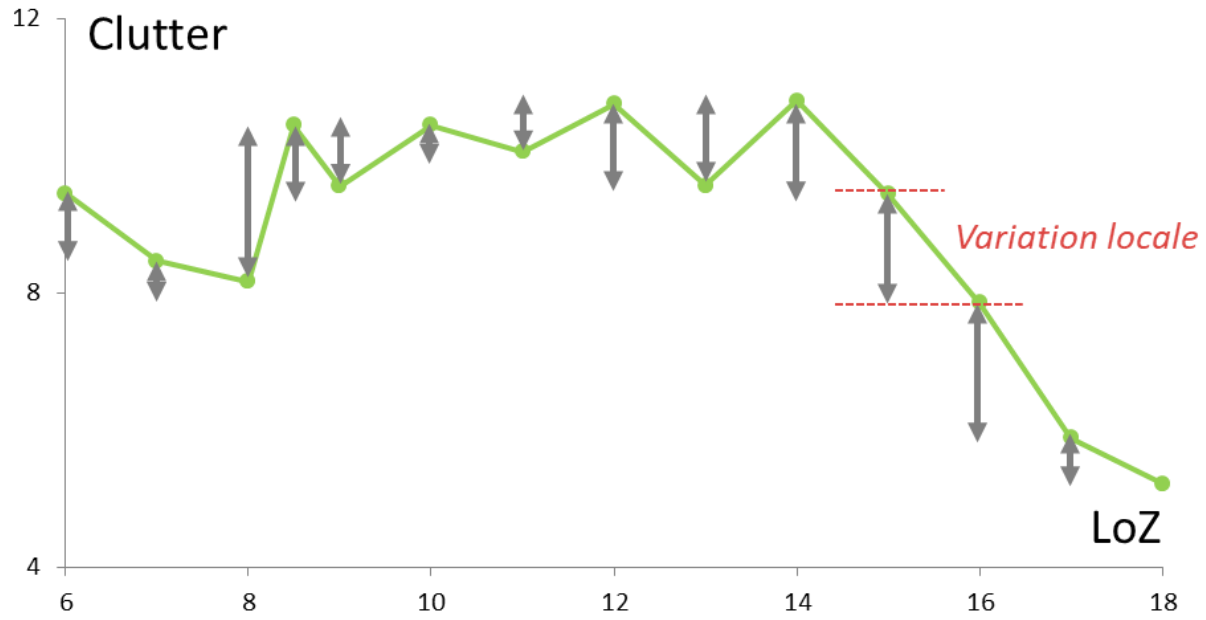


Figure 63. Illustration des variations locales des mesures de clutter en gris, c'est-à-dire des écarts de clutter entre deux niveaux de zoom consécutifs (LoZ), pour une pyramide donnée.

D'autre part, nous avons également pris en compte l'amplitude maximale entre la valeur minimale et la valeur maximale de clutter dans chaque pyramide, pour chacune des trois mesures de clutter. A partir de ces indicateurs, nous avons isolé les pyramides étudiées qui présentaient de très faibles variations et de très fortes variations, comparées à l'ensemble de notre panel. Il est intéressant de noter que parmi les pyramides qui présentent de **faibles variations** de clutter au fil des échelles, on retrouve des pyramides non institutionnelles (BingMaps et Google Maps). Elles utilisent des légendes homogènes et très peu de généralisation. Les pyramides institutionnelles qui font partie de cette catégorie (ACT Luxembourg, GDI Allemagne, USGS États-Unis) utilisent également des **légendes homogènes et leur contenu cartographique est relativement cohérent et adapté aux différentes échelles**. A l'inverse, les pyramides qui présentent de fortes variations (IGN Espagne, Lantmäteriet Suède, Scan IGN, Swisstopo) sont toutes des pyramides institutionnelles. Excepté la pyramide suédoise, ces pyramides sont construites à partir de cartes existantes hétérogènes, ce qui crée une importante variation de contenu (légende, généralisation, complexité visuelle) au fil des échelles. En ce qui concerne la pyramide suédoise, nous pensons que les choix de simplification multi-échelle (quantité de toponymes, quantité de pictogrammes, aire urbaine et bâtiments individuels superposés, etc.) peuvent expliquer les variations de clutter importantes. Ces valeurs extrêmes de clutter mesurées sont relativement logiques selon nos perceptions personnelles de la fluidité de navigation dans les pyramides étudiées. Cela nous conforte donc dans l'idée que **les mesures de clutter peuvent être un indicateur utile pour détecter des variations importantes de la complexité visuelle** d'une part, et d'autre part que **les variations de complexité visuelle doivent être limitées pour permettre une navigation plus fluide.**

Par ailleurs, nous constatons que les variations entre deux niveaux consécutifs semblent être plus importantes quand un même contenu est utilisé à deux échelles d'affichage consécutives. La Figure 64 montre ainsi trois niveaux de zoom consécutifs (12, 13 et 14) des pyramides Scan Express (en haut) et Scan IGN (en bas). La Figure 65 met en évidence en rouge la variation du clutter pour ces niveaux de zoom en particulier. Nous constatons ici que le niveau 13 présente une variation de clutter plus importante pour la pyramide Scan IGN, où le même contenu est utilisé aux niveaux 12 et 13, que pour la pyramide Scan Express, où le contenu est différent à chaque niveau de zoom. **Ce constat conforte notre hypothèse d'amélioration potentielle, qui consiste à ajouter des représentations intermédiaires à ces niveaux de zoom où le contenu n'est pas adapté à son échelle d'affichage.**

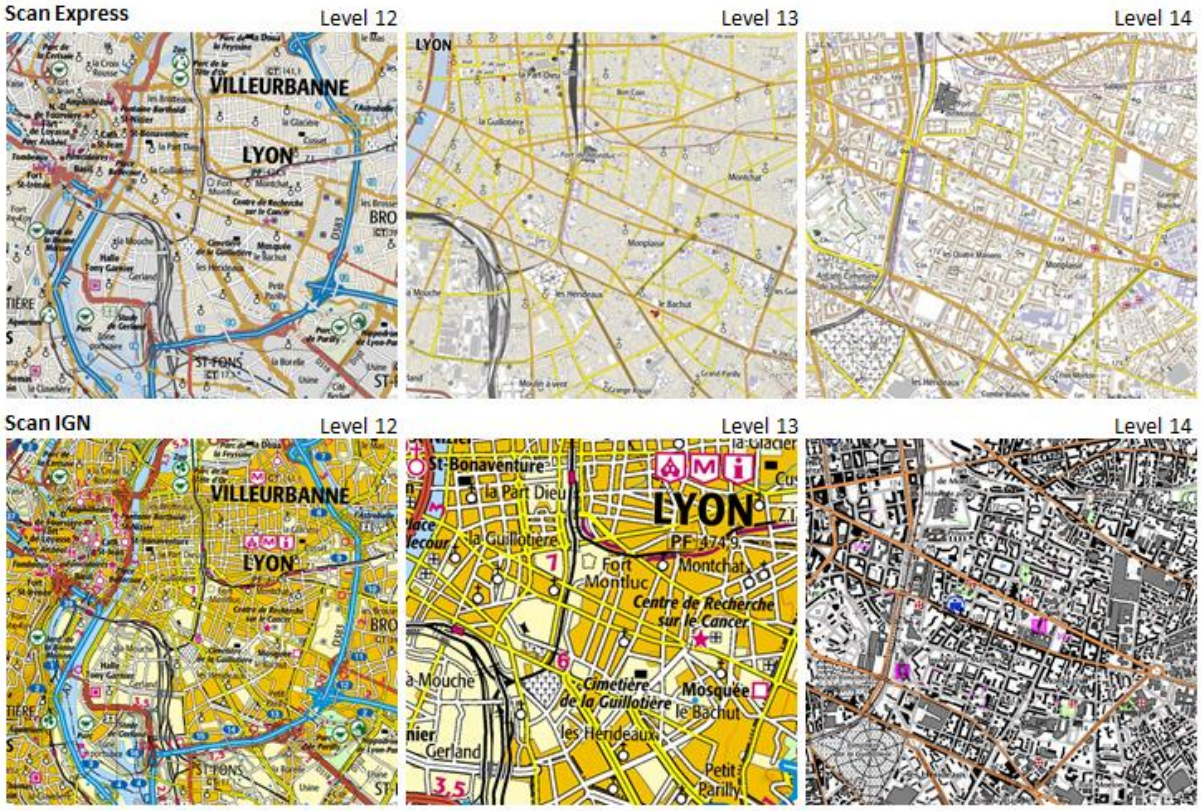


Figure 64. Trois niveaux de zoom consécutifs pour les pyramides Scan Express (en haut), où chaque niveau montre un contenu différent, et Scan IGN (en bas) où le contenu des niveaux 12 et 13 est le même.

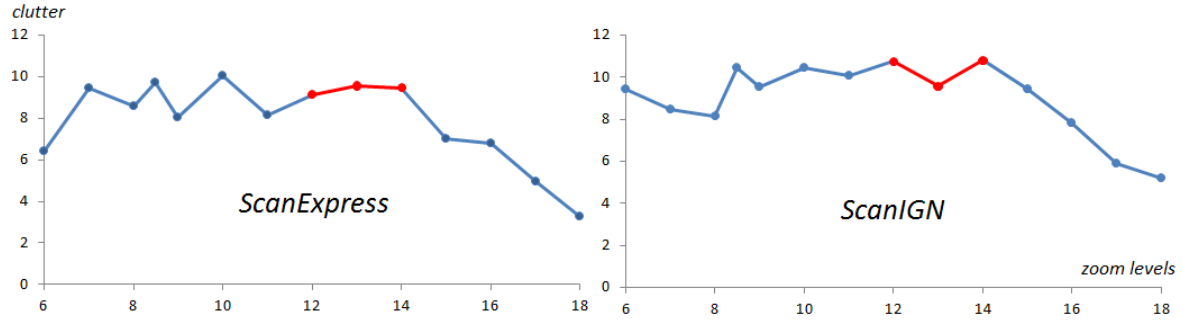


Figure 65. Évolution du clutter mesuré par la méthode de subband entropy pour les cartes présentées dans la Figure 64.

Pour identifier une tendance plus globale dans l'évolution des mesures de clutter au fil des échelles, nous avons calculé l'évolution moyenne sur l'ensemble des pyramides étudiées. Pour cela, nous avons calculé pour chaque niveau de zoom la moyenne des valeurs mesurées pour toutes les pyramides, pour une mesure de clutter donnée. La Figure 66 présente les courbes moyennes obtenues.

A partir de ces courbes, nous constatons que l'évolution du clutter au fil des échelles suit une forme de cloche : les valeurs sont plus faibles aux petites et grandes échelles, et plus importantes aux moyennes échelles, en particulier au niveau 12 qui correspond à l'échelle d'affichage 1 : 100k. Cette allure est cohérente avec nos observations : à petite échelle, la carte contient relativement peu d'information et à grande échelle, l'emprise géographique est si petite que bien que très détaillés, les objets représentés sont peu nombreux et donc facilement compréhensibles. Aux moyennes échelles en revanche, la quantité d'information et le niveau de détail sont relativement élevés. **Une piste d'amélioration potentielle serait donc de limiter les variations de clutter sur la plage d'échelles globale, pour homogénéiser la complexité visuelle sur l'ensemble de la pyramide.**

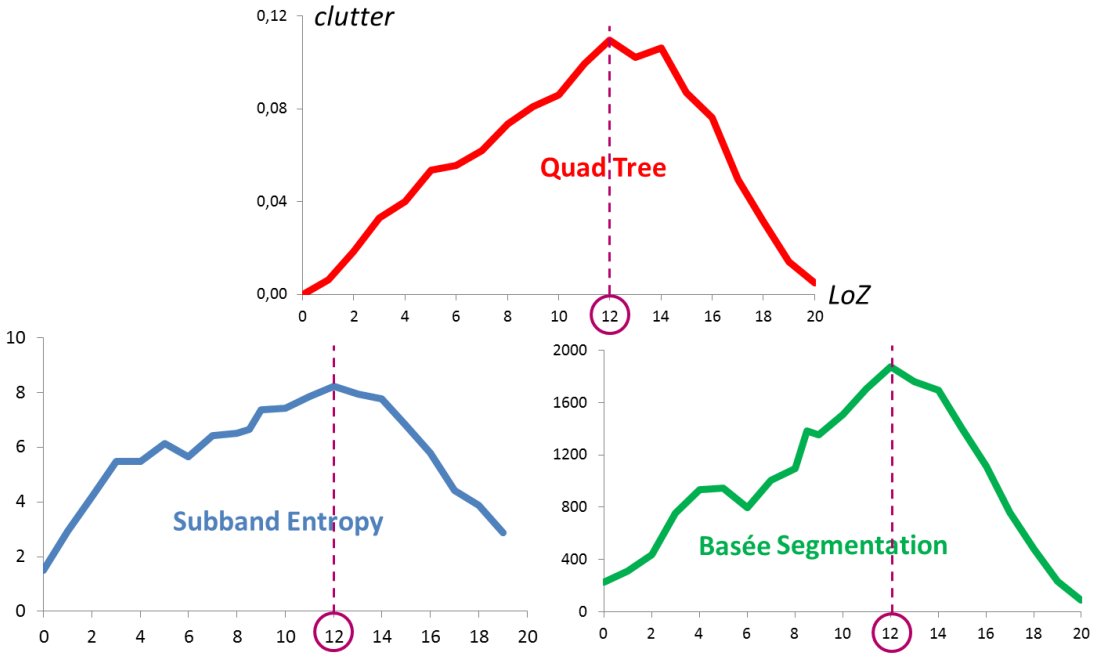


Figure 66. Courbe moyenne des mesures de clutter dans les 16 pyramides étudiées, pour chacune des trois mesures de clutter utilisées.

En se basant sur nos perceptions visuelles personnelles, nous constatons que les pyramides qui présentent de fortes variations de clutter demandent plus d'efforts pour naviguer et se repérer d'une échelle à l'autre. **Nous pensons donc que ces courbes d'évolution du clutter en fonction de l'échelle sont un indicateur utile pour détecter des difficultés potentielles pour l'utilisateur.** Elles pourraient donc être intégrées dans un processus de production d'une carte multi-échelle, pour évaluer la variation de complexité visuelle au fil des échelles et l'efficacité globale de la pyramide. Néanmoins, certaines mesures de clutter sont relativement sensibles à des choix de représentation utiles à la navigation de l'utilisateur, comme la présence de toponyme. Les résultats de ces mesures doivent donc être considérés avec précaution et comparés avec d'autres mesures basées sur des méthodes différentes, comme nous l'avons fait ici. Enfin, ces méthodes n'estiment qu'une partie de la

complexité visuelle de chaque niveau de zoom. Elles ne permettent pas de couvrir toute la complexité liée aux processus cognitifs impliqués dans la navigation multi-échelle. Elles ne suffisent donc pas pour mesurer la fluidité de navigation dans une carte multi-échelle et évaluer nos hypothèses d'amélioration. **Pour cela, nous utiliserons plutôt un test utilisateurs.**

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une étude comparative de 16 pyramides, pour produire des connaissances sur ce qui fait une bonne carte topographique multi-échelle. Par une première analyse visuelle, nous avons identifié des facteurs de difficulté potentielle pour la navigation multi-échelle et en particulier ceux auxquels nous nous consacrons dans cette thèse, à savoir **la non-adaptation du contenu à son échelle d'affichage et les changements de niveau d'abstraction**.

Après avoir défini la suite d'échelles d'affichage utilisée dans chaque géoportail de notre panel et confirmé l'application du standard WMTS, nous avons observé l'évolution de la simplification du contenu cartographique au fil des échelles. Nous avons d'abord constaté un manque de représentations cartographiques adaptées aux différentes échelles, pallié par les producteurs institutionnels par l'utilisation intensive des quelques cartes existantes, impliquant parfois des problèmes de lisibilité ou des variations importantes de complexité visuelle. **Produire de nouvelles représentations pour remplacer ces représentations non adaptées est donc une piste d'amélioration potentielle de la fluidité de navigation.**

Nous avons également constaté une démocratisation des systèmes de zoom continu, qui nous permet d'envisager **l'ajout de représentations intermédiaires, à de nouveaux niveaux de zoom**, sans révolutionner les interfaces de visualisation existantes. En étudiant plus en détail l'évolution de la simplification du contenu cartographique au fil des échelles, nous avons identifié des transitions de représentation intéressantes, comme les représentations mixtes pour le bâti et les représentations topologiques et ponctuelles pour le routier. **Nous sommes convaincus qu'ajouter des représentations intermédiaires utilisant ces transitions peut faciliter la compréhension des changements de niveaux d'abstraction, lisser les variations de complexité visuelle et permettre une navigation multi-échelle plus fluide.**

Pour confirmer nos premières découvertes, nous souhaitons maintenant mener un **test utilisateurs contrôlé**, car seul ce type d'expérience permet d'appréhender les mécanismes cognitifs complexes impliqués dans la navigation multi-échelle. Le Chapitre C formalise maintenant les hypothèses que nous souhaitons évaluer et propose un protocole de test permettant d'estimer la fluidité de navigation dans une carte multi-échelle.

Chapitre C
Hypothèses d'Amélioration des Cartes Multi-Échelles

Nous cherchons donc à découvrir empiriquement ce qui régit ce mécanisme cognitif complexe qu'est la navigation multi-échelle. Ces connaissances permettraient de guider les processus de production des représentations intermédiaires, pour aller vers des pyramides plus efficaces. Dans cette optique, nous formalisons ici des hypothèses concernant les variables de construction des représentations intermédiaires susceptibles d'influencer la fluidité de navigation dans une carte multi-échelle (§C.1), puis proposons un protocole pour évaluer cette influence (§C.2).

C.1. Hypothèses d'Amélioration des Cartes Multi-Échelles Existantes

L'étude présentée au chapitre précédent tend à confirmer notre intuition initiale, concernant le besoin de représentations intermédiaires pour proposer une représentation cartographique adaptée à l'échelle d'affichage de chacun des niveaux de zoom d'une carte multi-échelle, mais aussi pour simplifier la compréhension des transitions de représentation au fil des échelles. Dans cette partie, nous définissons ce concept de **représentation intermédiaire** et notre première hypothèse concernant ses variables de construction cartographique (§C.1.1). Puis, nous présentons pour chacune de ces variables nos hypothèses concernant son influence sur la fluidité de navigation (§C.1.2, §C.1.3, §C.1.4). Nous proposons ensuit dans la partie §C.2 un protocole d'évaluation de cette influence, basé sur un test utilisateurs.

C.1.1. Définition du Concept de Représentation Intermédiaire

Dans une carte multi-échelle, nous définissons une **représentation intermédiaire** comme une **nouvelle représentation cartographique** que l'on ajoute pour faciliter la navigation multi-échelle entre deux niveaux de zoom existants. La Figure 67 illustre la distinction que nous faisons entre une représentation intermédiaire et un **niveau de zoom intermédiaire**, qui n'est qu'**une échelle d'affichage ajoutée** à celles déjà disponibles, sans nouvelle représentation cartographique. Ainsi la seule utilisation d'un système de zoom continu ajoute de nombreux niveaux de zoom intermédiaires, mais aucune représentation intermédiaire, puisque leur contenu n'est qu'un agrandissement de la représentation cartographique disponible au niveau de zoom précédent. Notons que pour ajouter une représentation intermédiaire dans un système de zoom non-continu, il faudra aussi ajouter un niveau de zoom intermédiaire.

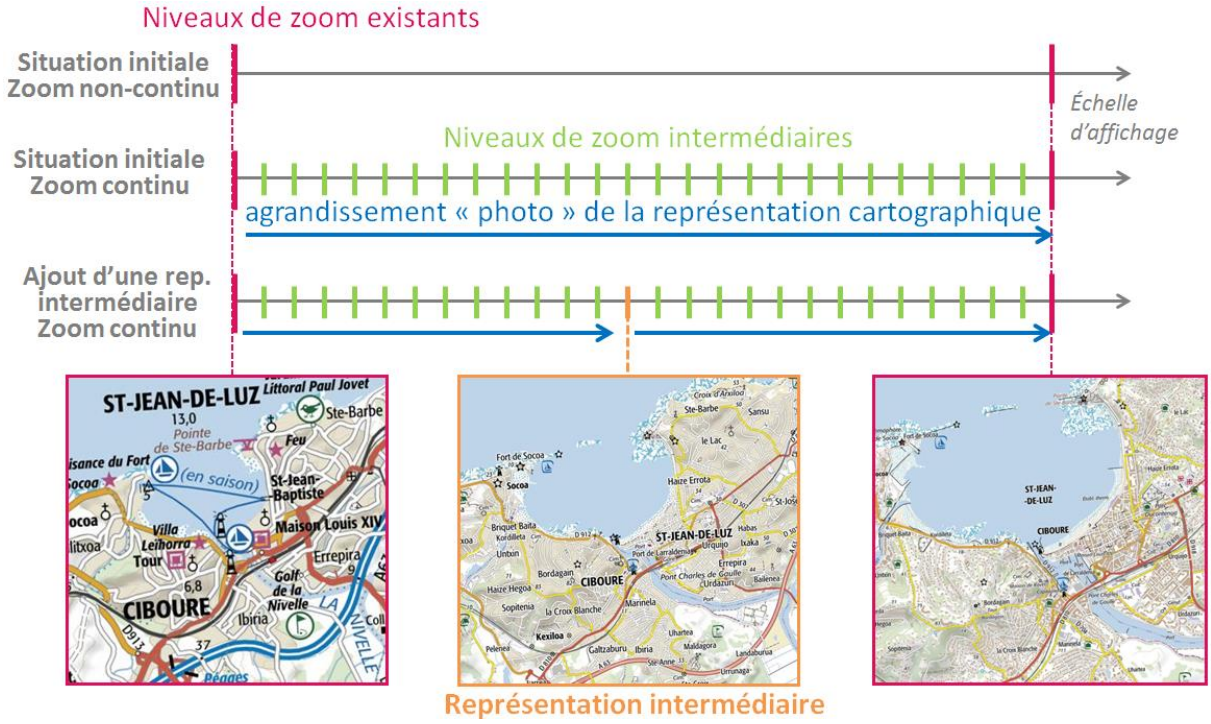


Figure 67. Distinction entre niveau de zoom intermédiaire et représentation intermédiaire.

Par ailleurs, la simplification et la symbolisation d'une représentation cartographique doivent être adaptées à son échelle d'affichage. Nous définissons ainsi **une représentation cartographique**

comme valide pour une échelle donnée lorsque celle-ci est lisible et efficace, c'est-à-dire que la quantité d'information représentée et le niveau d'abstraction utilisé sont en adéquation avec les cas d'utilisation prévus à cette échelle. Précisons que dans un système de zoom continu, une représentation cartographique étant affichée sur tout un intervalle d'échelles, son contenu devra être valide pour toutes les échelles de cet intervalle. Nous parlerons ainsi d'**intervalle de validité** d'une représentation cartographique pour désigner l'intervalle d'échelles d'affichage sur lequel cette représentation est valide. D'après nos constats du chapitre précédent, les producteurs institutionnels utilisent parfois des représentations cartographiques en dehors de leur intervalle de validité, par manque de représentations disponibles. Une représentation intermédiaire pourra donc également **remplacer** le contenu d'un niveau de zoom existant, quand la représentation cartographique initiale n'est pas valide à son échelle d'affichage.

Qu'elle remplace ou non une représentation existante, nous considérons qu'une représentation intermédiaire doit être une **étape permettant de mieux comprendre un changement de niveaux d'abstraction** entre les deux niveaux de zoom existants qui la précède et lui succède immédiatement dans la pyramide. Son contenu doit donc être **cohérent** avec celui des deux niveaux de zoom existants, mais il doit aussi permettre de créer une **transition de représentation plus progressive**. Le choix de son échelle d'affichage sera donc aussi important, puisqu'il influence la représentation du contenu cartographique et le rendu final de cette transition. Nous supposons ici qu'il peut être nécessaire d'ajouter plusieurs représentations intermédiaires entre deux niveaux de zoom existants, pour créer plusieurs étapes successives lorsque le saut de contenu initial est important.

Selon notre intuition, ajouter des représentations intermédiaires permettrait d'améliorer la fluidité de navigation entre deux niveaux de zoom existants d'une carte multi-échelle. Nous pensons cependant que cette amélioration potentielle dépend fortement des choix de construction de ces représentations. Nous supposons ici **que les variables suivantes sont susceptibles d'influencer la fluidité de navigation** :

- le nombre de représentations intermédiaires ajoutées ;
- la répartition des intervalles d'échelles sur lesquels ces représentations intermédiaires sont affichées ;
- la transition de représentation créée par l'évolution du contenu cartographique de ces représentations intermédiaires au fil des échelles.

Dans les paragraphes §C.1.2, §C.1.3 et §C.1.4, nous présentons pour chacune de ces variables nos hypothèses concernant son influence sur la fluidité de navigation. Pour simplifier la suite de cette discussion, **nous nous plaçons maintenant entre deux niveaux de zoom existants dont la représentation est adaptée à leur échelle d'affichage, sans représentation intermédiaire connue, dans un système de zoom continu**.

C.1.2. Nombre de Représentations Intermédiaires

Nous discutons ici **l'hypothèse selon laquelle le nombre de représentations intermédiaires aurait une influence positive sur la fluidité de navigation**, au sens où ajouter des représentations intermédiaires permettrait d'améliorer la fluidité de navigation.

Comme l'échelle d'affichage est une dimension continue, il est théoriquement possible d'ajouter un **grand nombre de niveaux de zoom et donc de représentations intermédiaires** entre deux niveaux

existants d'une pyramide. Les travaux de [van Oosterom et al., 2014] présentés dans le paragraphe §A.2.2 montrent qu'il est possible de produire un ensemble de représentations cartographiques sur un intervalle d'échelles continu, contre un coût de production raisonnable. Cependant, comme nous l'avons déjà évoqué, ces travaux n'intègrent pas facilement des changements de niveaux d'abstraction comme le passage de la représentation du bâti individuel à l'aire urbaine par exemple. Cette méthode ne peut donc pas être appliquée à une pyramide existante qui utiliserait ce type de transitions de représentation. Produire des représentations intermédiaires à la fois cohérentes entre elles et avec les représentations existantes, valides sur leur intervalle d'échelles respectif et qui permettent de fluidifier des transitions de représentation complexes reste un processus mal maitrisé et potentiellement coûteux. **Il est donc nécessaire de se poser la question au préalable, de l'intérêt d'ajouter un grand nombre de représentations intermédiaires.**

Les travaux en généralisation continue adoptent souvent la théorie suivante : plus on ajoute d'étapes intermédiaires dans la simplification du contenu cartographique au fil des échelles, plus la navigation sera fluide. Les travaux de [van Oosterom et al., 2014 ; Šuba et al., 2016] appliquent ainsi cette théorie et créent une représentation intermédiaire pour chaque modification élémentaire du contenu cartographique, comme l'élimination d'un seul bâtiment de la carte. En étudiant des résultats issus de ces travaux[1] nous faisons personnellement les constats suivants :

- L'application d'opérations de généralisation non-continues limite de fait cette théorie : ici on ne peut créer qu'un nombre fini de représentations, égal au nombre d'objets éliminés.
- La disparition successive d'objets élémentaires à différents endroits dans la carte attire le regard de l'utilisateur dans de multiples directions, lui faisant perdre d'éventuels points de repère et perturbant ainsi sa navigation.
- La logique d'application des changements n'est pas toujours compréhensible. Il est ainsi perturbant de voir disparaitre successivement et non pas simultanément des bâtiments dont on ne perçoit pas (à l'œil nu) la différence de taille. La somme de ces incompréhensions locales fait que l'on a finalement du mal à appréhender les transitions de représentation globales entre les différentes échelles.

Une expérience utilisant ces résultats[2] [Šuba et al., 2016] montre que les utilisateurs réalisent une tâche cartographique plus rapidement avec un continuum basé sur ces travaux, mais font moins d'erreurs avec une carte multi-échelle classique. Nous pensons cependant que ces premiers résultats ne sont pas généralisables : la carte multi-échelle utilisée dans l'expérience n'est sans doute pas la plus fluide possible. Elle a été construite à partir de représentations extraites du continuum, sans véritable réflexion quant à la distribution des échelles d'affichage choisies ou aux transitions de représentation qui en résultent. Nous restons convaincus que **le nombre de représentations intermédiaires doit être limité**, pour que les différences entre deux représentations successives restent compréhensibles de l'utilisateur. Notons ici que définir ces différences compréhensibles de manière empirique serait très coûteux, car il faudrait tester de nombreuses conditions pour déterminer des seuils théoriques. Par ailleurs, ceux-ci ne seraient pas généralisables, car ils dépendraient des représentations utilisées mais aussi certainement de l'expérience de l'utilisateur. Nous nuançons donc simplement notre hypothèse initiale, en considérant qu'il est possible qu'elle ne soit **valide que jusqu'à un certain nombre, au-delà duquel ajouter plus de représentations intermédiaires pourrait avoir une influence nulle voire négative sur la fluidité de navigation.**

[1] https://kartographie.geo.tu-dresden.de/downloads/ica-gen/workshop2016/Radan_demo_task.avi
[2] https://kartographie.geo.tu-dresden.de/downloads/ica-gen/workshop2016/Radan_presentation.pdf

Par ailleurs, si l'on se base sur les intervalles d'échelles recommandés par le standard WMTS et les transitions de représentation que nous avons observées dans les cartes multi-échelles existantes, nous pensons qu'il est souvent nécessaire d'ajouter plusieurs représentations intermédiaires pour rendre ces transitions compréhensibles. Si la navigation initiale est particulièrement difficile, il est possible que l'on mesure un comportement différent lors de l'ajout des premières représentations intermédiaires : une très grande amélioration si celles-ci changent profondément la nature de la navigation, ou bien au contraire pas d'amélioration du tout si la navigation reste trop difficile. **Il existe donc peut-être un seuil minimal en dessous duquel le nombre de représentations intermédiaires n'a pas d'influence sur la fluidité de navigation**. Nous formalisons donc finalement l'hypothèse A suivante, illustrée par la Figure 68 :

Hypothèse A. Il existe un couple de valeurs nb_{min} et nb_{max} entre lesquelles le **nombre de représentations intermédiaires** a une influence positive sur la fluidité de navigation, où nb_{min} correspond au nombre de représentations intermédiaires minimum nécessaire pour obtenir une amélioration de la fluidité de navigation et nb_{max} le nombre de représentations intermédiaires à ne pas dépasser au risque de voir cette influence positive s'inverser.

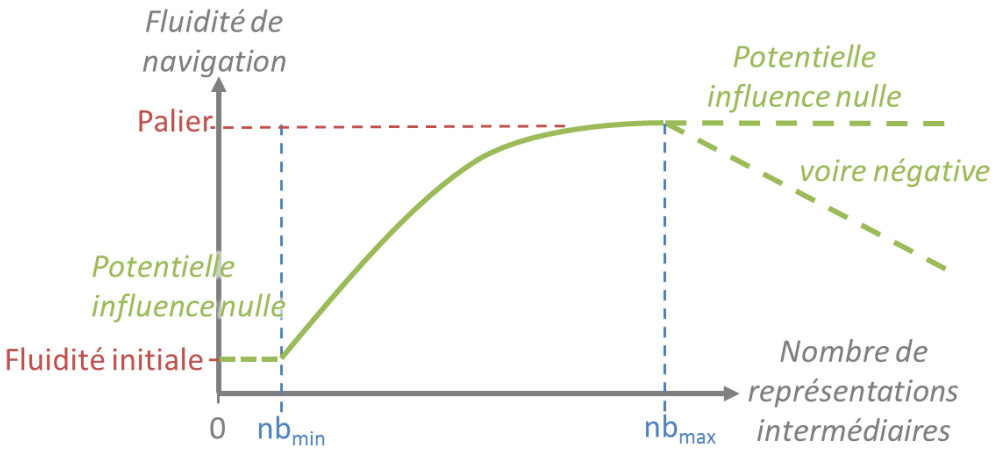


Figure 68. Évolution théorique attendue de la fluidité de navigation en fonction du nombre de représentations intermédiaires ajoutées, selon notre hypothèse. Précisons que cette figure n'a vocation qu'à illustrer notre hypothèse ici et n'a aucune valeur mathématique.

L'étude de cette variable en particulier pose plusieurs problèmes. Dans un premier temps, bien que le nombre de représentations intermédiaires soit par définition une valeur finie, il nous semble qu'il vaudrait mieux parler de **quantité de représentations intermédiaires** lorsque l'on considère son influence sur la fluidité de navigation. Sur cet intervalle [nb_{min} ; nb_{max}] notamment, il est en effet peu probable que nous puissions mesurer une amélioration significative à une représentation intermédiaire près. Il nous faudrait plutôt comparer l'évolution de la fluidité avec des quantités de représentations intermédiaires sensiblement différentes. Il faudrait donc produire de nombreuses représentations intermédiaires pour déterminer un couple de valeurs [nb_{min} ; nb_{max}], ce qui est coûteux.

D'ailleurs, ce couple de valeurs **varie vraisemblablement en fonction de la situation initiale**, c'est-à-dire de l'intervalle d'échelles et de la transition de représentation à simplifier. Il est même probable qu'au sein d'une même carte, la quantité de représentations intermédiaires optimale varie pour les

différents types d'objets géographiques. Dans ce cas, nous considérons que la quantité à utiliser pour l'ensemble de la carte doit être le maximum des quantités estimées nécessaires pour chaque type d'objets, quitte à garder la représentation de certains objets invariante d'une échelle à l'autre. On retrouve ici le principe du ScaleMaster [Brewer et Buttenfield, 2007; Touya et Girres, 2013] dans l'idée de décorréler le processus de généralisation multi-échelle de chaque type d'objets géographiques. Ainsi en pratique, même si nous parvenions à calculer ces valeurs extrêmes pour notre cas d'application, elles ne seraient applicables à aucun autre.

Enfin, pour mesurer l'influence de cette variable uniquement, il faudrait qu'elle soit la seule à varier entre les différentes conditions du test. Or si l'on ajoute des représentations intermédiaires, on modifie par définition la répartition des intervalles d'échelles d'affichage et la transition de représentation. Il nous semble donc peu pertinent d'étudier l'influence de cette variable sur la fluidité de navigation, sans avoir de connaissances solides sur le comportement des deux autres. **Nous choisissons donc d'écarter pour le moment l'étude de cette variable.**

C.1.3. Répartition des Intervalles d'Affichage des Représentations Intermédiaires

Précisons en préambule que nous parlons ici d'échelle d'affichage comme d'une valeur numérique précise, mais que nous considérons en pratique qu'elle est approximative, variant en fonction des systèmes de visualisation et de projection cartographique utilisés par le producteur.

Pour créer une représentation intermédiaire, il est **nécessaire de définir l'échelle d'affichage visée** pour déterminer les contraintes à appliquer, qui régissent la simplification de son contenu cartographique et la modélisation de son processus de généralisation. Chaque représentation intermédiaire ainsi produite sera donc valide pour son échelle d'affichage cible, mais aussi vraisemblablement d'autres échelles avoisinantes formant son **intervalle de validité**.

Pour chaque représentation intermédiaire, il faudra ensuite choisir l'intervalle d'échelles sur lequel elle sera affichée, puisque l'on se place dans un système de **zoom continu**. Si l'intervalle d'affichage d'une représentation intermédiaire doit bien être compris dans son intervalle de validité pour qu'elle soit adaptée, **il peut par contre en être différent**. En effet, plus l'on ajoutera de représentations intermédiaires, plus celles-ci pourront être affichées sur un petit intervalle, finalement inférieur à leur intervalle de validité. En ajoutant plusieurs représentations intermédiaires, on découpera ainsi la plage d'échelles existante en plusieurs intervalles d'amplitudes variées, selon une **certaine répartition**. Cette **répartition des intervalles d'affichage** va déterminer la progressivité de l'évolution du contenu cartographique au fil des échelles. Nous pensons donc qu'elle est **susceptible d'influencer la fluidité de navigation** et discutons ainsi l'hypothèse B suivante :

Hypothèse B. À nombre et contenu constants, tout en respectant leurs intervalles de validité, la **répartition des intervalles d'échelles d'affichage** des représentations intermédiaires a une influence sur la fluidité de navigation.

Pour l'étudier selon une dimension continue, nous considérons maintenant l'échelle d'affichage comme la **valeur numérique** correspondant au rapport habituellement utilisé, par exemple nous utilisons la valeur 0,00004 pour l'échelle 1 : 25k. L'amplitude d'un intervalle d'échelles désignera donc la différence de ses deux valeurs extrêmes. Utilisé dans les pyramides existantes, le standard WMTS définit une suite d'échelles d'affichage augmentant selon un ratio équivalent (x2 ou x2.5), ce

qui implique que **les intervalles d'échelles d'affichage entre les différents niveaux de la pyramide sont de plus en plus grands à mesure que l'échelle augmente**. Dans un système de zoom continu, les échelles d'affichage disponibles sont infinies et nous pouvons désormais nous interroger sur la pertinence de cette répartition et proposer des alternatives.

Les intervalles de validité de différentes représentations intermédiaires ne sont pas forcément disjoints, comme l'illustre la Figure 69. **Plusieurs répartitions des intervalles d'affichage des représentations intermédiaires sont donc possibles, tout en respectant l'intervalle de validité de chacune**. Ici il est vraisemblable que plus l'on ajoutera de représentations intermédiaires, plus leurs intervalles se chevaucheront et plus le nombre de répartitions possibles sera conséquent.

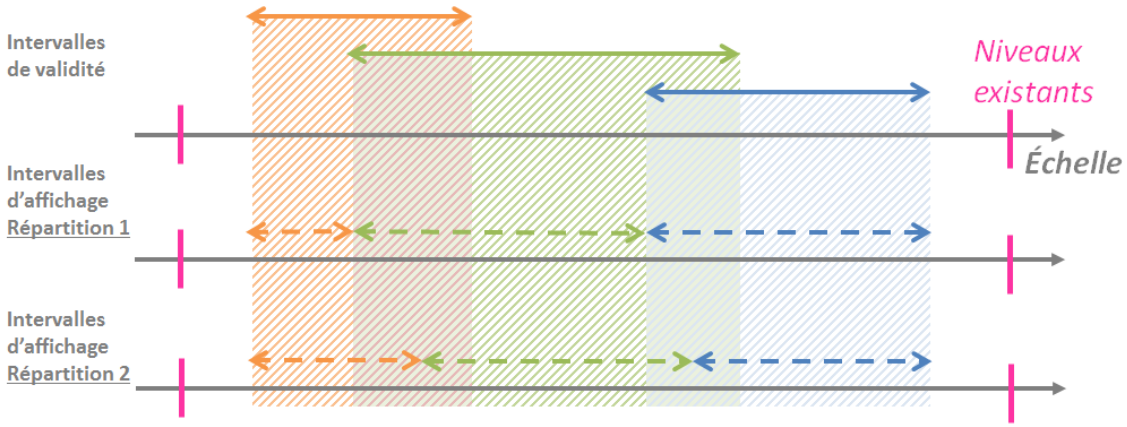


Figure 69. Différentes répartitions des intervalles d'échelles d'affichage de trois représentations intermédiaires, tout en respectant leur intervalle de validité.

Il est donc théoriquement possible d'étudier l'influence de cette variable sur la fluidité de navigation indépendamment des autres variables, c'est-à-dire à nombre et contenu de représentations intermédiaires constants. Nous considérons bien sûr que cette influence n'est possible que si la différence entre deux répartitions est suffisamment importante pour être sensible, même inconsciemment, de l'utilisateur. On pourrait par exemple choisir cette répartition en fonction d'**échelles critiques**, où une simplification drastique est nécessaire (§A.2.1). Cette option permettrait d'optimiser les changements de représentation au moment où ils sont vraiment nécessaires, tout en limitant le nombre de représentations intermédiaires à produire. En s'autorisant un plus grand nombre de représentations intermédiaires, nous pourrions également utiliser des **intervalles d'échelles d'amplitude équivalente**, ce qui permettrait d'avoir un changement de représentation plus fréquent mais moins important, donc plus progressif au fil des échelles, comme illustré par la Figure 70.

Cette question sur l'influence de la répartition des intervalles demande une réflexion plus globale sur la perception humaine du saut d'échelles d'affichage. Notamment, dans le standard WMTS, bien que l'intervalle d'échelles soit de plus en plus grand à mesure que l'échelle augmente, le ratio avec lequel le contenu cartographique est représenté est constant (x2 ou x2.5). Nous ne savons pas aujourd'hui lequel de ces facteurs est majoritairement perçu par l'utilisateur, donc sur quel facteur jouer pour améliorer la progressivité d'évolution du contenu. Par ailleurs, il apparait assez clairement que l'influence de la répartition des intervalles d'affichage est particulièrement liée à la transition de représentation utilisée, car l'échelle d'affichage détermine en partie la simplification du contenu. **Il nous semble donc plus pertinent de commencer par étudier les transitions de représentation.**

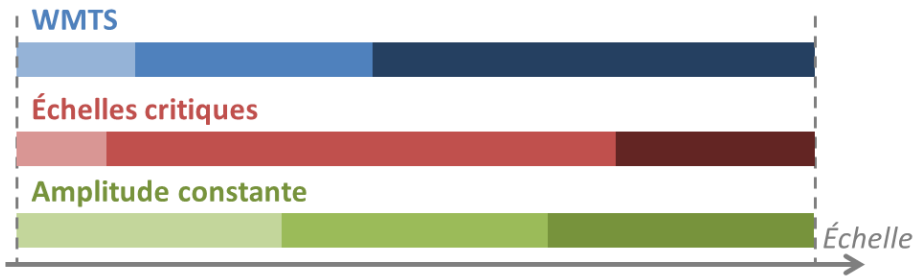


Figure 70. Différence de répartition entre des intervalles d'échelles respectant le standard WMTS (en haut), des échelles critiques (au milieu, simplement illustratives ici) et des intervalles d'échelles d'amplitude constante (en bas).

C.1.4. Transition de Représentation Créée par les Représentations Intermédiaires

Construire des représentations intermédiaires nécessite évidemment de faire des choix de représentation cartographique en modélisant leur processus de production, pour qu'elles simplifient la transition de représentation existante. L'étude présentée au chapitre précédent nous a permis d'identifier des facteurs potentiellement perturbateurs pour l'utilisateur : **les changements de niveaux d'abstraction, la simplification drastique du contenu cartographique et la perte des repères visuels**. Nous discutons ici nos hypothèses concernant l'influence de chacun de ces facteurs sur la fluidité de navigation et proposons pour chacune de ces problématiques des améliorations potentielles.

Quel que soit le nombre de représentations intermédiaires ajoutées, un **changement de niveau d'abstraction** peut intervenir de manière brutale, c'est-à-dire entre deux échelles consécutives, ou bien de manière plus progressive, en plusieurs étapes étalées sur plusieurs échelles. Dans le paragraphe §B.4.3, nous avons ainsi identifié pour le thème du bâti des transitions intéressantes basées sur l'utilisation de représentations mixtes. Pour rappel nous parlons de *représentation mixte* si deux niveaux d'abstraction sont utilisés pour représenter le même type d'objets géographiques, en fonction du contexte géographique (représentation conjointe) ou en superposition graphique (représentation simultanée). Il est assez difficile de comparer l'influence de chacune de ces alternatives sur nos perceptions de la fluidité de navigation, car de nombreuses autres variables de construction cartographique entrent en jeu dans les pyramides existantes. Néanmoins, il nous a globalement semblé que ces transitions permettaient de mieux appréhender les changements de niveaux d'abstraction qui interviennent lors de la navigation multi-échelle. Nous formalisons donc l'hypothèse C1 suivante :

Hypothèse C1. À nombre de représentations intermédiaires et intervalles d'affichage constants, **utiliser des représentations mixtes** a une influence positive sur la fluidité de navigation.

Même s'ils utilisent un même niveau d'abstraction, des niveaux de zoom consécutifs peuvent présenter une **simplification drastique**. En effet, si le degré de généralisation n'évolue pas de manière progressive et cohérente en fonction de l'échelle d'affichage, un petit saut d'échelles pourra impliquer un changement de représentation important. Nous pensons ici qu'utiliser des opérations de généralisation continue permettrait d'appliquer une simplification proportionnée en fonction du saut d'échelles, améliorant ainsi la progressivité de la transition de représentation. À l'opposé, nous reconnaissons aussi le potentiel des opérations de typification, opérations discontinues qui permettent de diminuer la quantité d'objets représentés tout en conservant à petite échelle une

représentation détaillée de l'information. Comparée à d'autres opérateurs comme la sélection ou l'agrégation, la typification permet donc de préserver une représentation détaillée de l'information à plus petite échelle. La transition de représentation obtenue avec une opération de typification sera différente de celle obtenue avec une opération d'agrégation, qui simplifie plus rapidement l'information. Nous formalisons donc l'hypothèse C2 suivante :

Hypothèse C2. À nombre de représentations intermédiaires et intervalles d'affichage constants, la **progressivité de simplification du contenu cartographique au fil des échelles** a une influence positive sur la fluidité de navigation.

Si des méthodes ont été proposées pour estimer le degré de généralisation d'une représentation cartographique (cf. §A.4.2), on ne sait pas modéliser en pratique un algorithme de généralisation permettant d'obtenir un résultat conformément à ce degré de généralisation. Dans cette thèse, nous ne chercherons pas à l'évaluer de manière absolue, mais plutôt **relativement à celui des représentations existantes**. Nous pourrons ainsi comparer la quantité de bâtiments ou la longueur du réseau routier, en vérifiant que l'évolution de ces mesures est régulière au fil des différentes échelles, en fonction des valeurs présentes dans les représentations existantes. Nous évaluerons également la progressivité de l'évolution du degré de généralisation au fil des échelles de **manière visuelle**, en naviguant dans la pyramide ainsi créée.

Enfin, nous considérons que la **perte des repères visuels** est un facteur majeur des difficultés de navigation multi-échelle. Ces éléments visuellement structurants permettent à l'utilisateur de se repérer dans la carte à une échelle donnée. S'ils disparaissent après un saut d'échelles, à cause d'un changement de niveau d'abstraction ou d'une simplification drastique, l'utilisateur aura plus de difficultés à s'orienter dans la nouvelle représentation affichée. Nous avons montré dans le paragraphe §B.4.3 qu'il était parfois possible de **préserver une représentation détaillée des éléments visuellement saillants** après un changement de niveau d'abstraction. Cette précaution pourrait être prise en compte dans le processus de généralisation, si l'on s'impose de préserver les caractéristiques saillantes de ces repères visuels, tout en s'autorisant à simplifier leurs autres caractéristiques si nécessaire, pour assurer leur lisibilité. Pour simplifier notre discours, nous dirons que l'on préserve ainsi une **représentation fidèle** des repères visuels. Nous formalisons donc l'hypothèse C3 suivante :

Hypothèse C3. À nombre de représentations intermédiaires et intervalles d'affichage constants, **conserver une représentation fidèle des repères visuels** a une influence positive sur la fluidité de navigation.

Nous avons ici défini le concept de **représentation intermédiaire** et identifié trois variables de construction susceptibles selon nous d'influencer la fluidité de navigation : le nombre, la répartition des intervalles d'affichage et la transition de représentation qu'elles créent au fil des échelles. Pour chacune de ces variables, nous avons émis des hypothèses sur cette influence potentielle. Nous proposons dans le paragraphe suivant §C.2 un **protocole de test utilisateurs** pour évaluer ces hypothèses.

C.2. Protocole d'Évaluation de nos Hypothèses

Dans ce paragraphe, nous présentons uniquement le type d'évaluation et les hypothèses que nous envisageons de tester, car ces choix conditionnent la production du matériel de test que nous présentons dans le Chapitre D. Le plan d'expérience sera ensuite décrit plus en détail dans le Chapitre E, où nous présenterons le panel d'utilisateurs visé, la tâche choisie pour l'expérience, les conditions de test, les mesures utilisées et les résultats de l'évaluation.

A travers nos hypothèses, nous cherchons à estimer l'influence potentielle, des différentes variables de construction des représentations intermédiaires, sur la fluidité de navigation. Nous devons donc dans un premier temps **définir une méthode pour évaluer la fluidité de navigation**. La navigation cartographique multi-échelle est un processus cognitif complexe, dont on ne connait pas encore suffisamment les mécanismes. Nous proposons donc d'utiliser une **évaluation par l'utilisateur** plutôt que des mesures analytiques, qui ne permettraient pas de couvrir toute la complexité qu'implique la navigation multi-échelle. L'idée ici est de demander à l'utilisateur de **réaliser une tâche de navigation dans une pyramide multi-échelle**, puis d'estimer la difficulté perçue en lui demandant d'émettre un jugement qualitatif, ou la difficulté avec laquelle il a réalisé la tâche en mesurant une performance, comme le temps d'exécution par exemple. La navigation dans une pyramide sera alors considérée plus ou moins fluide en fonction de ces résultats.

Pour évaluer chacune de nos hypothèses, concernant l'influence d'une variable en particulier sur la fluidité de navigation, nous devrons comparer les résultats (jugements ou performances) obtenus avec des pyramides utilisant différentes valeurs de cette variable. Pour la préservation d'une représentation fidèle des repères visuels, nous comparerons ainsi les résultats obtenus sur une pyramide les préservant et sur une autre pyramide, où aucune précaution n'est prise quant à leur préservation. Pour que cette comparaison soit pertinente, seule la variable que nous étudions doit être différente entre ces deux pyramides, sinon nos résultats pourraient être biaisés par un autre facteur. **Pour maitriser au mieux notre matériel de test, nous produirons nous-même les pyramides testées**, **en faisant varier uniquement de l'une à l'autre la valeur de l'une de nos variables d'étude,** comme présenté dans le Chapitre D.

Pour mener ce test, nous devrons donc **identifier une ou plusieurs tâches, qui reflètent justement les difficultés de la navigation dans une carte multi-échelle**. Par ailleurs, demander à l'utilisateur de réaliser une **tâche équivalente** sur les différentes pyramides est essentiel, car sinon nous ne pourrions discriminer l'influence de ce facteur de l'influence de nos autres variables d'étude. Nous définissons deux **tâches comme équivalentes** si un utilisateur obtiendrait des performances sensiblement similaires en les réalisant sur une même pyramide. Toutes les tâches demandées devront donc idéalement faire intervenir les mêmes mécanismes cognitifs et présenter la même difficulté. La tâche choisie devra aussi être **suffisamment reproductible** dans notre matériel de test, pour proposer à chaque essai du test une tâche différente mais de même complexité.

Pour limiter les biais dus aux conditions de réalisation du test, nous choisissons de réaliser un **test utilisateur contrôlé**, c'est-à-dire de le réaliser dans un environnement maitrisé et en présence d'un instructeur. Contrairement à un test diffusé en ligne, nous pourrons ainsi recueillir des données et éviter des biais concernant le comportement de l'utilisateur au fil du test. Néanmoins ce type d'expérience, plus lourd à organiser et plus contraignant à réaliser pour les participants, nous impose de **limiter la durée du test et le nombre de participants**, donc le nombre d'hypothèses évaluées.

Le temps nécessaire pour produire ce matériel de test et conduire ces expériences étant assez conséquent, nous avons donc dû nous contraindre à privilégier l'étude d'une seule variable de construction dans le cadre de cette thèse. Nous avons ainsi choisi d'étudier **les transitions de représentation**, considérant comme nous l'avons précédemment expliqué qu'il était préférable de traiter cette variable en premier, car elle conditionnait certainement l'étude des deux autres variables de construction des représentations intermédiaires. **Nous n'évaluerons donc que les hypothèses C1, C2 et C3 dans notre test utilisateurs**.

Enfin pour ces mêmes raisons, nous choisissons de limiter notre étude à un seul thème géographique, en faisant varier uniquement **la représentation des objets bâtis**, que nous avons particulièrement étudiée dans les pyramides existantes. Ce thème géographique est celui qui nous semble avoir l'évolution visuelle la plus complexe à appréhender au fil des échelles. Il présente donc un potentiel d'amélioration particulièrement important.

Dans ce chapitre, nous avons formalisé nos hypothèses concernant l'amélioration des cartes multi-échelles. Pour évaluer ces hypothèses, nous réaliserons une **évaluation par l'utilisateur** que nous présenterons plus en détail dans le Chapitre E. Pour évaluer l'influence de chaque variable indépendamment, nous choisissons de **produire notre propre matériel de test** en créant plusieurs pyramides où seule varie notre variable d'étude. Le temps nécessaire pour produire ce matériel de test et conduire ces expériences étant assez conséquent, **nous choisissons de nous concentrer uniquement sur le contenu des représentations intermédiaires** et les transitions qu'elles créent au fil des échelles. Nous étudierons donc en particulier l'utilisation de représentation mixte (Hypothèse C1), la progressivité d'évolution du contenu au fil des échelles (Hypothèse C2) et la préservation d'une représentation fidèle pour des repères visuels (Hypothèse C3). En revanche, nous fixerons le nombre de représentations intermédiaires utilisées et leurs échelles d'affichage. Le Chapitre D présente maintenant la production de ce matériel de test.

Chapitre D
Production de Représentations Intermédiaires

Pour disposer d'un matériel de test adéquat, nous choisissons un cas d'application extrait de la pyramide Scan Express de l'IGN, entre les cartes existantes au 1 : 25k et au 1 : 100k (§D.1). Pour tenter de simplifier cette transition initiale, nous produisons trois représentations intermédiaires (§D.2), en généralisant les données sources au 1 : 25k à trois niveaux de détail différents (§D.3). Puis, nous déclinons quatre versions différentes de cette pyramide, chacune implémentant une transition de représentation différente pour le thème du bâti (§D.4). Enfin, nous détaillons le processus de création des pyramides et la configuration du système de visualisation choisi pour notre test (§D.5).

D.1. Cas d'application et Pyramide Initiale

Après avoir présenté la pyramide Scan Express produite par l'IGN, (§D.1.1), dont un extrait nous servira de cas d'application (§D.1.2), où nous tenterons d'améliorer la fluidité de navigation initiale en ajoutant des représentations intermédiaires à la pyramide existante.

D.1.1. Cas d'application : la Pyramide Scan Express

Nous avons choisi de construire notre cas d'application à partir d'un extrait de la **pyramide Scan Express** produite par l'IGN [IGN 2014], déjà mentionnée à plusieurs reprises dans cette thèse. Cette pyramide couvre le territoire administratif français et est aujourd'hui composée de huit cartes définies du 1 : 5k au 1 : 1M, affichées sur 14 niveaux de zoom (dans le Géoportail de l'IGN). **Elle contient donc moins de cartes que de niveaux de zoom disponibles.**

Les données sources de ces cartes sont dérivées de différentes bases de données du référentiel de l'IGN (BD TOPO®, BD CARTO®, BD ALTI®, ROUTE 120®). D'une part, cela signifie que les cartes à différentes échelles de la pyramide Scan Express peuvent donc être issues de différentes bases de données sources, elles-mêmes obtenues par différents processus : elles peuvent donc présenter des **incohérences de contenu**. D'autre part, les représentations cartographiques à différentes échelles sont donc produites indépendamment et leurs relations multi-échelles ne sont pas toujours connues. Ainsi, **il n'est pas trivial de mettre en correspondance ou d'apparier les données de cette pyramide à différentes échelles**, pour vérifier leur cohérence ou prendre en compte ces représentations existantes lorsque l'on produit des représentations intermédiaires.

Par ailleurs, cette pyramide a été spécialement conçue pour répondre aux besoins des utilisateurs d'avoir des données plus actualisées. Il est ainsi prévu que les cartes à grande échelle de la pyramide Scan Express soient mises à jour chaque semestre [IGN 2014]. Pour diminuer les coûts et délais de production et ainsi permettre une réédition plus fréquente, des **processus de généralisation quasi-automatiques** sont utilisés à grande échelle [Lafay et al., 2015]. Seules quelques corrections interactives complètent ce processus, comme le placement manuel des toponymes majeurs, lorsque l'algorithme de placement automatique ne parvient pas à fournir un résultat satisfaisant. Pour réussir ce challenge, la qualité du résultat cartographique a été revue à la baisse. En particulier, des conflits spatiaux entre objets voisins ou des géométries invalides persistent dans la pyramide Scan Express. Pour garantir le bon fonctionnement des processus que nous utilisons et la cohérence de nos pyramides, nous serons donc parfois obligés de **corriger ces données initiales** avant de pouvoir les généraliser.

En termes de symbolisation cette fois, la pyramide Scan Express utilise des **légendes homogènes** au fil des échelles [IGN 2014]. Rappelons que dans la partie §B.2.1, nous avons identifié les hétérogénéités de légende comme un facteur potentiel de désorientation, que nous avons choisi d'écarter de nos travaux. Parmi les légendes proposées par l'IGN illustrées précédemment en Figure 60, nous avons choisi d'utiliser la légende *Standard*. Comme nous l'avons déjà mentionné, cette légende a été spécifiquement choisie pour que la pyramide Scan Express puisse servir de fond de carte topographique à des surcouches de données thématiques, ses couleurs sont donc atténuées par rapport aux cartes traditionnelles de l'IGN. Cependant, ces choix de légende ont été réalisés à grande échelle, puis propagés aux différentes échelles en fonction des données existantes. Il est donc **toujours possible de trouver localement des hétérogénéités de symbolisation** entre les cartes à

différentes échelles dans la pyramide Scan Express, comme nous l'illustrons dans la partie §D.1.2.

Pour évaluer l'amélioration apportée par les représentations intermédiaires que nous allons produire, il nous faudra visualiser la pyramide ainsi créée. Par définition, la pyramide Scan Express est principalement destinée à être utilisée au format numérique, notamment pour des cas d'application nécessitant une navigation multi-échelle. Elle est consultable sur le **Géoportail français**[1], mis en œuvre par l'IGN pour le partage et la consultation de l'information géographique de référence. Son interface de visualisation respecte la suite d'échelles d'affichage définie par le **standard WMTS**. La relation entre échelle d'affichage et échelle de symbolisation que nous présentions dans la partie §B.3.3 est également respectée, excepté aux petites échelles où les cartes disponibles dans la pyramide Scan Express ne suffisent pas à fournir une représentation adaptée à chaque niveau de zoom (points bleu clair sur la Figure 40). Par ailleurs, le Géoportail n'utilise pas de système de zoom continu pour le moment, mais réalise un **zoom animé** lors d'un changement d'échelle, proposant ainsi des opérations de zoom relativement fluides en termes d'affichage. Néanmoins, sa structure reste limitée aux échelles définies par le standard WMTS. Nous ne pourrons donc pas nous en servir pour visualiser des pyramides contenant des représentations intermédiaires à d'autres échelles que celles du standard. **Nous devrons donc identifier un système de visualisation multi-échelle**, qui en plus de fournir un zoom continu, permettrait de paramétrer précisément l'intervalle d'affichage de chaque représentation cartographique, sans se limiter au standard WMTS. Nous détaillons ce choix dans la partie §D.5.

Cette thèse étant réalisée au sein de l'IGN, nous avons également choisi cette pyramide car nous avions un **accès facilité** aux données vectorielles sous-jacentes et à son équipe de production. En pratique, nous avons récupéré ces données sous la forme d'une **base de données PostGIS**, extraite de la base de travail de cette équipe. La partie suivante explique comment nous avons préparé notre matériel initial à partir de ces données.

D.1.2. Préparation et Limites du Matériel Initial

Nous choisissons d'étudier plus spécifiquement la transition existante entre les deux cartes illustrées par la Figure 71.

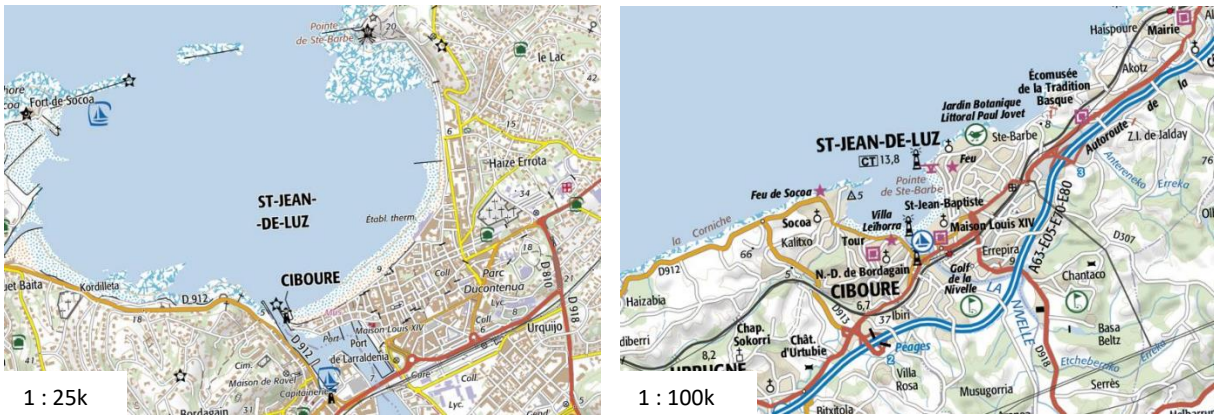


Figure 71. Extrait de la pyramide Scan Express, des cartes existantes définies au 1 : 25k et au 1 : 100k.

[1] https://www.geoportail.gouv.fr/carte?c=-1.66,43.38&z=15&l0=GEOGRAPHICALGRIDSYSTEMS.MAPS.SCAN-EXPRESS.STANDARD::GEOPORTAIL:OGC:WMTS(1)&permalink=yes

Ces cartes sont respectivement définies au **1 : 25k et au 1 : 100k** et sont affichées dans le géoportail **au 1 : 10k et 1 : 50k** (niveaux 14 et 12 du standard WMTS), ce qui est cohérent avec la relation entre échelle de symbolisation et échelle d'affichage que nous avons mise en évidence en §B.3.3. Dans la suite de ce chapitre, nous désignerons ces cartes existantes par leur échelle de symbolisation. Si l'on reprend les ordres de grandeur de [Lacoste 1980, p21], on peut dire que ces cartes représentent respectivement le niveau de détail du **quartier**, avec des bâtiments individuels et un réseau routier très détaillé ; et de **l'agglomération**, avec les aires urbaines et les axes routiers majeurs.

Nous choisissons ainsi d'étudier les **transitions de représentation entre grande échelle** (supérieure à 1 : 50k) **et moyenne échelle** (inférieure à 1 : 500k), telles que définies par [Robinson et al., 1995]. D'une part, cette transition de représentation nous semble parmi les plus complexes à appréhender pour l'utilisateur, à cause des changements importants d'échelles et de niveaux d'abstraction, en particulier pour le thème du bâti. D'autre part, cette gamme d'échelles et d'abstraction géographique est traitée par l'ensemble des producteurs cartographiques : nos conclusions seront donc utiles au plus grand nombre.

Dans la pyramide Scan Express en particulier, il existe entre ces deux cartes existantes une autre carte, définie au 1 : 50k et affichée au 1 : 25k, illustrée par la Figure 72. Cette représentation reprend majoritairement le contenu de la carte définie au 1 : 25k, seul le bâti étant simplifié en une représentation en aires urbaines (en beige). **Nous préférons ne pas considérer cette carte dans la construction de nos pyramides** car cela limiterait beaucoup nos choix en termes de répartition des intervalles d'affichage et de transition de représentation. Néanmoins, nous utiliserons cette carte dans notre pyramide dite *initiale*, composée uniquement des trois représentations existantes aux 1 : 25k, 1 : 50k et 1 : 100k, qui servira d'étalon de comparaison pour évaluer l'amélioration apportée par nos propositions à la fluidité de navigation.

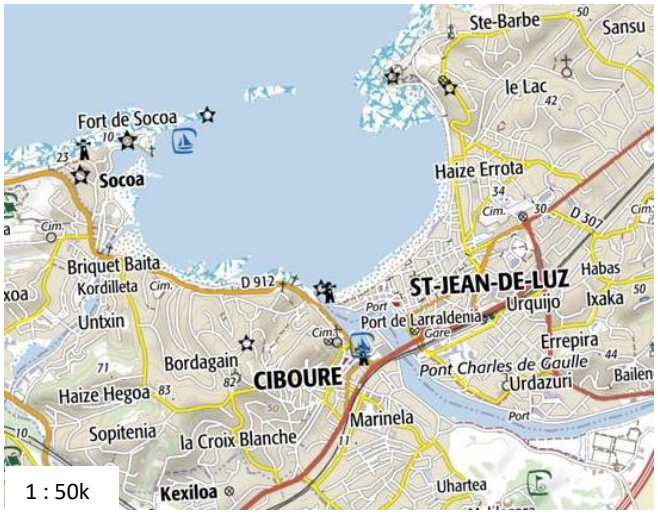


Figure 72. Extrait de la carte définie au 1 : 50k dans la pyramide Scan Express, le bâti étant représenté sous forme d'aires urbaines (en beige).

Par ailleurs, pour limiter le temps de production du matériel de test, nous choisissons de limiter la taille de notre zone d'étude à la taille utile à notre expérience, c'est-à-dire recouvrant l'écran utilisé pendant notre expérience, à l'échelle d'affichage du 1 : 50k (où est initialement diffusée la carte existante au 1 : 100k). Nous avons ainsi défini une **zone d'étude d'environ 30 km par 15 km** dans la région de Saint-Jean-de-Luz (Pyrénées-Atlantiques), illustrée par la Figure 73.

Figure 73. Situation géographique de notre zone d'étude, dans le sud-ouest de la France (en rouge à droite), sur une emprise de 30 km par 15 km autour de Saint-Jean-De-Luz (à gauche). La carte Scan Express définie au 1 : 250k sert ici à des fins d'illustration et n'est pas utilisée par ailleurs.

Cette zone a également été choisie en fonction de son contexte géographique. Elle regroupe des paysages géographiques variés (littoral, montagne, urbain, rural) nous permettant de confronter nos réflexions à leurs différentes caractéristiques. La proximité avec la frontière espagnole et la présence d'une zone maritime et de zones urbaines en quantité limitée nous ont aussi permis de réduire un peu le temps de production.

Pour limiter la complexité de notre expérience (côté utilisateurs) et le temps de production de notre matériel de test, nous choisissons également de n'utiliser qu'une partie des thèmes géographiques représentés dans les cartes Scan Express. Nous laissons ainsi de côté la représentation du relief et des points d'intérêt touristiques, thèmes particulièrement saillants et sources de complexité visuelle. Notre pyramide initiale ne représentera donc que les **thèmes de la végétation, de l'occupation du sol, de l'hydrographie, des limites administratives, des réseaux ferré et routier, des structures publiques non bâties (cimetières, terrains de sport) et enfin du bâti**. Par ailleurs, nous supposons que la représentation multi-échelle des toponymes joue un rôle important dans la fluidité de navigation, mais ne souhaitons pas couvrir cette problématique dans notre expérience. Pour éviter un quelconque biais dû aux toponymes, nous choisissons de n'intégrer que les noms des six villes les plus importantes de la zone, avec une position et une typographie invariantes au fil des échelles. Le rendu des représentations existantes avec ces simplifications est présenté dans la Figure 74. Un extrait de la pyramide initiale ainsi construite à partir des données Scan Express est aussi présenté en Annexe G.1.

A partir de la base de données cartographique fournie par l'IGN, nous avons ainsi construit notre propre **base de données** à partir des classes d'entités nécessaires pour représenter ces thèmes géographiques, en extrayant les données présentes sur notre zone d'étude uniquement. Dans la suite de cette thèse, nous ferons référence à cette base de données initiale lorsque nous mentionnerons les données sources du processus de production cartographique. Une première analyse de ces données sources a mis en lumière des problèmes de **redondance**, principalement aux frontières du quadrillage de production utilisé par l'IGN, que nous avons corrigées. Pour le thème du bâti, nous avons également identifié de nombreux chevauchements dans la carte au 1 : 25k, issus du processus de généralisation quasi-automatique. Les algorithmes de généralisation que nous utilisons étant sensibles à ces conflits spatiaux, nous avons corrigé les données sources en déplaçant les

bâtiments en intersection, voire en éliminant certains bâtiments lorsque c'était nécessaire. L'algorithme utilisé pour ce faire sera décrit plus en détail dans la partie §D.4.2.

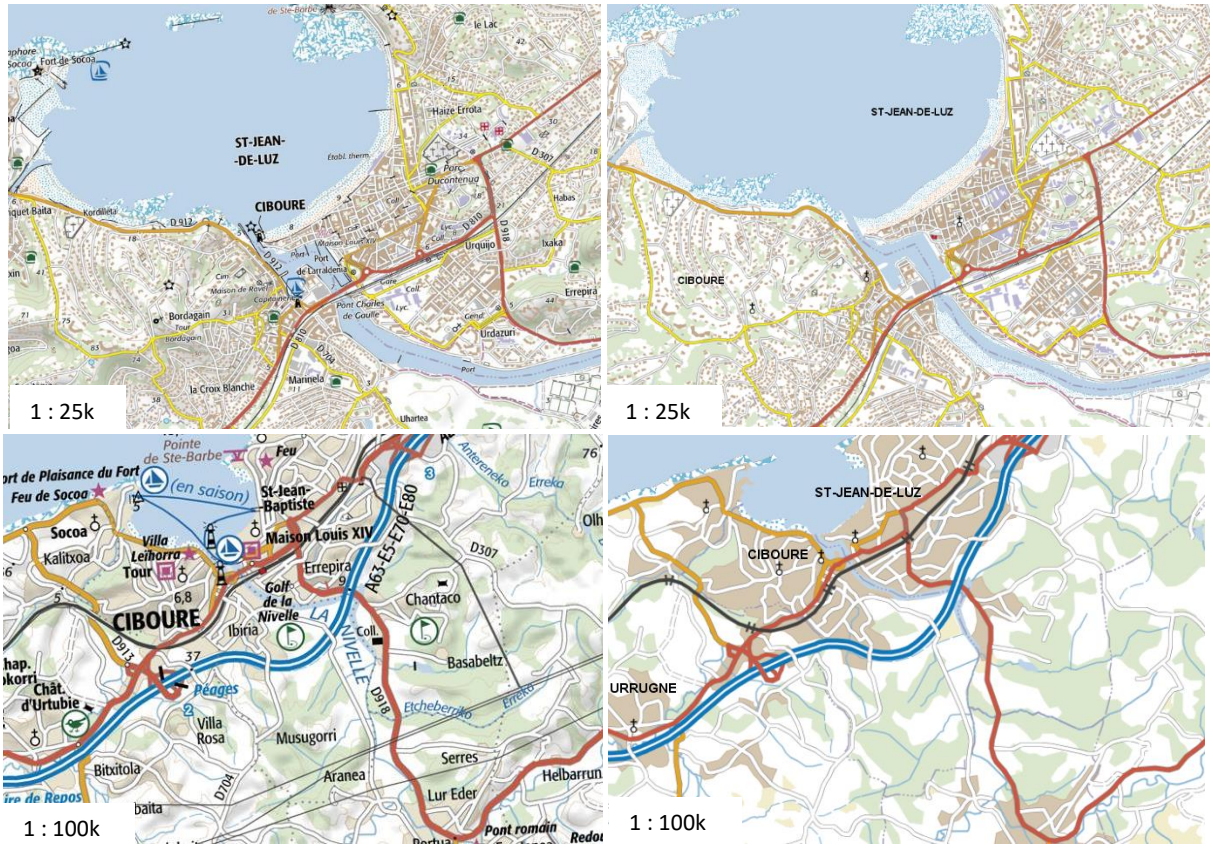


Figure 74. Comparaison entre les représentations existantes (à gauche) et le matériel de test (à droite), après sélection des thèmes géographiques, pour la carte au 1 : 25k (en haut) et au 1 : 100k (en bas).

Avant de passer à la production de représentations intermédiaires, nous avons aussi étudié les relations entre objets homologues entre les deux représentations existantes au 1 : 25k et au 1 : 100k, **pour détecter d'éventuelles incohérences entre échelles**. Ces relations ne sont pas explicitement fournies dans les données sources, qui sont issues de bases de données différentes et produites avec des processus de généralisation indépendants [IGN 2014]. Nous avons donc effectué une première phase de détection d'incohérences basée sur une sélection par intersection entre les objets au 1 : 25k et au 1 : 100k, pour les différents thèmes géographiques utilisés. Etant donné la quantité et la gravité des incohérences estimées par cette méthode, nous avons considéré qu'un traitement global n'était pas nécessaire sur notre zone d'étude. Nous avons donc fait le choix **de corriger localement** ces incohérences lorsqu'elles étaient potentiellement gênantes selon nous pour la navigation de l'utilisateur. Par exemple, quand un tronçon routier était présent au 1 : 100k sans homologue connu au 1 : 25k, nous avons choisi de le supprimer de la représentation moins détaillée pour homogénéiser la pyramide initiale. Néanmoins, sur une zone d'étude plus importante, il faudrait certainement appliquer un processus plus robuste, basé sur un algorithme d'appariement de réseaux multi-échelle [Mustière et Devogèle, 2008] voire multicritères [Olteanu-Raimond et al., 2015].

Au-delà du contenu, nous avons également identifié quelques **hétérogénéités de légende** entre les cartes existantes au 1 : 25k et au 1 : 100k, notamment entre les symbolisations des routes comme

déjà mentionné. Sur la Figure 75, la classification des routes change entre les deux cartes, impliquant des changements de symbolisation pour certains objets. Les routes de moyenne importance, en jaune sur la carte au 1 : 25k, passent ainsi en blanc sur la carte au 1 : 100k, comme les quelques routes de moindre importance conservées. Ces changements s'expliquent par une simplification de la classification des routes, pour réduire la complexité du réseau global à petite échelle, mais peuvent présenter un biais pour notre expérience s'ils interviennent sur des objets qui servent de repères à l'utilisateur.

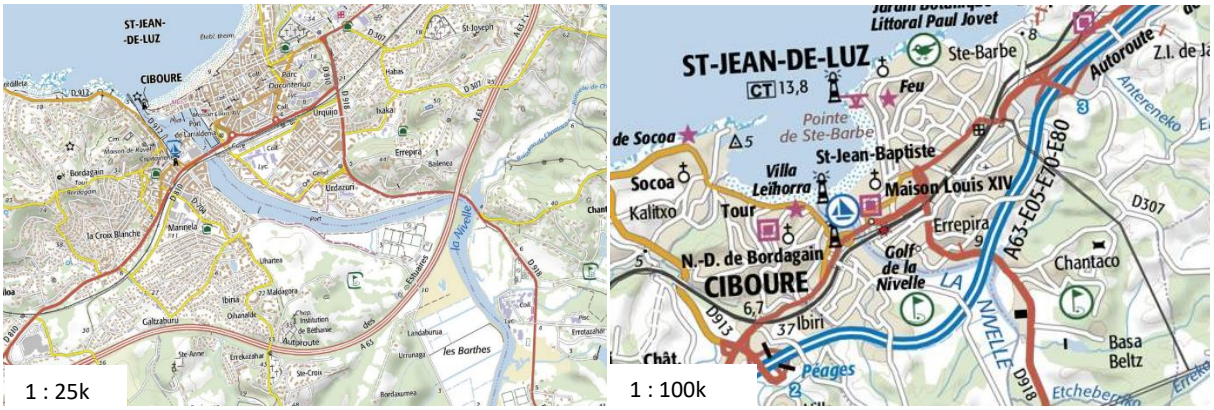


Figure 75. Hétérogénéités de légende entre les représentations des routes dans les cartes existantes : l'autoroute, particulièrement saillante en bleu sur la carte au 1 : 100k, ne l'est plus en rouge au 1 : 25k ; les routes secondaires en jaunes au 1 : 25k sont représentées en blanc au 1 : 100k.

Ainsi, l'autoroute en bleu sur la carte au 1 : 100k est représentée en rouge au 1 : 25k. Cet objet est particulièrement saillant par sa forme et sa position, visuellement structurante de notre zone géographique. Il nous semble donc particulièrement dangereux pour la significativité de notre expérience de conserver ce changement de représentation, au risque que ce facteur perturbe nos participants. Nous choisissons donc de **corriger la carte au 1 : 25k pour homogénéiser la représentation des autoroutes**. En revanche, nous choisissons **de conserver les hétérogénéités de légende en l'état pour les autres objets cartographiques,** car homogénéiser ces symbolisations (en jaune ou en blanc) risquerait de diminuer la qualité de l'une des cartes. Depuis cette étude, l'IGN a d'ailleurs pris la décision d'homogénéiser la représentation des routes entre les différentes échelles de sa future pyramide cartographique.

Nous avons choisi d'étudier la transition existante entre les cartes Scan Express définies au 1 : 25k et au 1 : 100k. Nous avons construit notre matériel de test initial à partir d'un extrait de ces représentations, sur une zone d'étude autour de la région de Saint-Jean-de-Luz. Dans la partie suivante, nous présentons les **choix de construction des représentations intermédiaires** que nous allons créer pour simplifier cette transition initiale.

D.2. Choix de Construction des Représentations Intermédiaires

Nous énonçons et justifions ici nos choix concernant le nombre de représentations intermédiaires que nous allons produire (§D.2.1) et la répartition des intervalles d'échelles d'affichage que nous allons utiliser (§D.2.2). Puis nous présentons la méthode que nous adoptons pour choisir la symbolisation (§D.2.3) et la généralisation des représentations intermédiaires que nous allons produire (§D.2.4).

D.2.1. Nombre de Représentations Intermédiaires

Entre les deux représentations existantes définies au 1 : 25k et au 1 : 100k, nous allons donc ajouter plusieurs représentations intermédiaires, pour améliorer la fluidité de navigation dans notre pyramide initiale.

Comme mentionné précédemment dans la partie §C.1.2, nous pensons qu'il existe une **quantité de représentations intermédiaires minimum**, au-dessous de laquelle on risque de ne mesurer aucune amélioration de la fluidité de navigation. En termes de simplification du contenu cartographique, nous pensons également qu'un minimum de représentations intermédiaires est nécessaire si l'on veut **créer une transition de représentation en plusieurs étapes**. Pour choisir le nombre de représentations intermédiaires, nous devons donc prendre en compte **la plage d'échelles et le saut de contenu** considéré entre nos cartes existantes. A l'inverse, nous sommes limités par le temps de production de notre matériel de test, sachant que le nombre de représentations intermédiaires choisi sera multiplié par le nombre de pyramides que l'on souhaite produire.

Ici, produire un nombre impair de représentations intermédiaires nous permettrait d'adopter une **démarche dichotomique**, comme l'illustre la Figure 76. Nous pourrions alors commencer (en orange) par créer une représentation intermédiaire « à mi-chemin » des deux cartes existantes en termes de simplification du contenu cartographique, avant de calculer (en vert) les représentations intermédiaires entre les cartes existantes et la première représentation intermédiaire, de la même manière. Cette approche permettrait de mieux contrôler l'évolution du niveau d'abstraction au fil des échelles, mais impliquerait potentiellement des incohérences de contenu entre les représentations niv1 et niv2 notamment, qui seraient produites indépendamment.

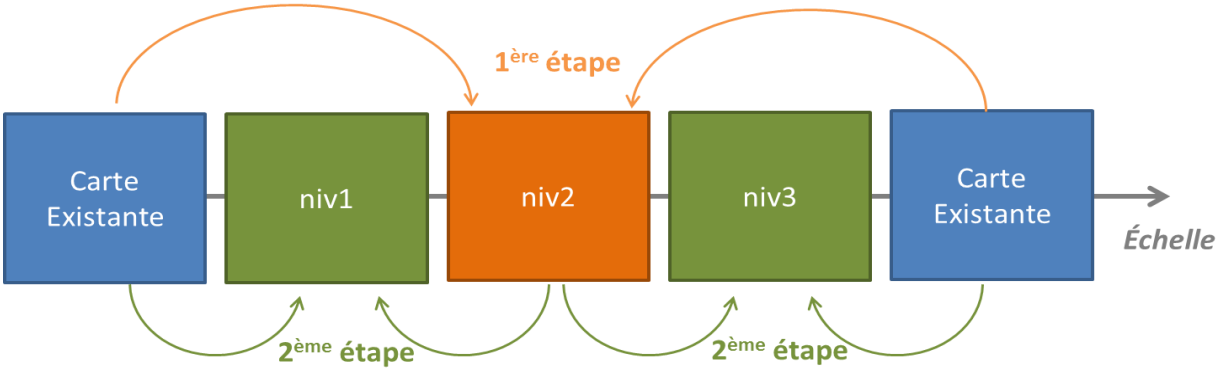


Figure 76. Proposition de démarche dichotomique pour produire un nombre impair de représentations intermédiaires : on produit d'abord la représentation niv2, comme « à mi-chemin » des cartes existantes en termes de simplification du contenu cartographique, avant de produire respectivement les niv1 et niv3, elles aussi comme intermédiaire entre le niv2 et la carte existante correspondante.

Il nous semble donc plus pertinent de générer les représentations intermédiaires les unes après les autres, de la plus détaillée à la moins détaillée, appliquant une approche de dérivation « en échelle » [Stoter 2005], comme présentée en §A.2.5. **Logiquement, repartir à chaque fois du résultat précédent permettrait en effet d'assurer une meilleure cohérence de contenu entre les représentations intermédiaires**. Nous appliquerons cependant cette démarche dichotomique pour valider visuellement la progressivité de l'évolution du niveau d'abstraction entre les représentations

intermédiaires, en comparant chaque fois une représentation intermédiaire aux deux représentations qui la précède et lui succède dans la pyramide.

Finalement, nous choisissons de produire **trois représentations intermédiaires**, que nous appellerons respectivement niv1, niv2 et niv3, de la plus à la moins détaillée. Précisons ici que nous ne sommes pas assurés que ce nombre soit suffisant pour améliorer significativement la fluidité de navigation et devrons produire ces représentations pour pouvoir estimer sa pertinence.

D.2.2. Répartition des Intervalles d'Affichage des Représentations Intermédiaires

Pour produire chacune de ces représentations intermédiaires, il nous faut maintenant choisir l'échelle d'affichage à laquelle elle sera affichée, pour définir ses contraintes en termes de simplification et modéliser son processus de généralisation. Néanmoins, nous ne disposons pas de connaissances solides sur la relation entre l'échelle d'affichage et la simplification nécessaire du contenu cartographique. En revanche, les contraintes cartographiques qui régissent cette simplification et la modélisation du processus de généralisation sont relativement bien définies par chaque producteur institutionnel, en fonction de l'échelle de symbolisation visée. Nous pensons donc qu'il est plus pertinent en l'état de produire une représentation intermédiaire **pour une échelle de symbolisation équivalente à l'échelle d'affichage visée**. Pour obtenir cette échelle de symbolisation, nous appliquerons la relation identifiée dans le paragraphe §B.3.3, à savoir qu'elle est égale à la moitié de l'échelle d'affichage. Pour vérifier la pertinence de cette méthode, le résultat obtenu devra cependant être validé par une **expertise visuelle à l'échelle d'affichage visée**.

Dans notre cas d'étude, les représentations existantes définies au 1 : 25k et 1 : 100k sont disponibles dans deux systèmes de projection différents sur le Géoportail de l'IGN. Elles sont ainsi affichées aux échelles 1 : 17 062 et 1 : 68 247 en Web Mercator Sphérique et aux échelles 1 : 11393 et 1 : 45570[1] en Lambert 93. Comme nous l'expliquions dans la partie §B.3.2, la suite d'échelles d'affichage utilisée est adaptée du standard WMTS en fonction du système de projection utilisé et peut donc varier légèrement d'une pyramide à l'autre. Nous considérons ici que **ces cartes existantes sont respectivement affichées approximativement au 1 : 10k et au 1 : 50k** et travaillerons donc sur cette plage d'échelles d'affichage. Par ailleurs, rappelons ici que si les contraintes de lisibilité sont relativement bien définies en fonction de l'échelle de symbolisation, ce n'est pas le cas des contraintes de simplification, c'est-à-dire des choix du niveau d'abstraction et du degré de généralisation. **Le choix initial des échelles d'affichage comme des échelles de symbolisation est donc relativement empirique et il serait peu pertinent d'être précis ici.**

Comme nous nous plaçons dans un système de zoom continu, le choix de ces échelles cibles détermine l'intervalle d'échelles sur lequel sera affichée chacune de nos trois représentations intermédiaires. Comme expliqué précédemment dans la partie §C.1.3, les possibilités offertes par les systèmes de zoom continu nous permettent de sortir de la suite d'échelles imposée par le standard WMTS. Nous pouvons donc envisager différentes répartitions pour les intervalles d'échelles d'affichage des représentations intermédiaires. Cependant, comme nous n'étudions pas spécifiquement l'influence de cette variable ici, nous choisissons une répartition relativement arbitraire dans un premier temps. **Puis, nous adapterons a posteriori les intervalles d'échelles d'affichage en fonction du contenu des représentations intermédiaires, en cherchant à optimiser la**

[1] https://geoservices.ign.fr/documentation/geoservices/wmts.html#r%C3%A9solutions---niveaux-de-zoom

progressivité d'évolution du contenu cartographique au fil des échelles. Finalement, nous définissons donc la suite d'échelles d'affichage et de symbolisation suivante pour nos représentations intermédiaires :

- représentation existante — affichée au 1 : 10k et définie au 1 : 25k
- représentation intermédiaire niv1 — **affichée au 1 : 20k et définie au 1 : 40k**
- représentation intermédiaire niv2 — **affichée au 1 : 30k et définie au 1 : 60k**
- représentation intermédiaire niv3 — **affichée au 1 : 40k et définie au 1 : 80k**
- représentation existante — affichée au 1 : 50k et définie au 1 : 100k

Ce choix ne garantit pas un changement de représentation régulier, mais permettra de proposer plus de représentations aux moyennes échelles où les conflits spatiaux entre objets cartographiques et donc le besoin de généralisation sont plus importants.

D.2.3. Symbolisation des Représentations Intermédiaires

La **symbolisation des données Scan Express** est fournie sous forme de **fichiers SLD** (*Styled Layer Descriptor*)[1]. Ce standard basé sur le format XML permet de formaliser le style de couches de données graphiques, comme l'illustre la Figure 77. Ici, on spécifie une règle de représentation pour la couche *Bâtiments*. Les objets dont l'attribut *nature* a la valeur *Bâtiment commercial* seront ainsi symbolisés par un polygone de couleur grise (*#bfbfbf*) prenant la forme de leur géométrie.

```
<StyledLayerDescriptor>
    <NamedLayer>
        <Name>Bâtiments</Name>
        <UserStyle>
            <FeatureTypeStyle>
                <Rule>
                    <Name>Bâtiment commercial</Name>
                    <Filter>
                        <PropertyIsEqualTo matchCase="true">
                            <PropertyName>nature</PropertyName>
                            <Literal>Bâtiment commercial</Literal>
                        </PropertyIsEqualTo>
                    </Filter>
                    <PolygonSymbolizer uom="http://www.opengeospatial.org/se/units/metre">
                        <GeometryPropertyName>geometrie</GeometryPropertyName>
                        <Fill>
                            <CssParameter name="fill">#bfbfbf</CssParameter>
                        </Fill>
                    </PolygonSymbolizer>
                </Rule>
            </FeatureTypeStyle>
        </UserStyle>
    </NamedLayer>
</StyledLayerDescriptor>
```

Figure 77. Exemple de fichier SLD permettant de définir une règle de symbolisation pour une couche de données géographiques *Bâtiments*. Ici les objets dont l'attribut *nature* prend la valeur *Bâtiment commercial* seront représentés par un polygone de couleur grise (*#bfbfbf*) prenant la forme de leur géométrie.

Précisons ici que bien que l'utilisation de cette structure standard soit répandue dans la communauté géomatique, tous les logiciels (GeoServer, Qgis, GeOxygene) et utilisateurs n'utilisent pas exactement la même syntaxe de fichiers SLD. Dans notre cas, nous avons récupéré les SLD Scan Express au format

[1] http://www.opengeospatial.org/standards/sld

GeoServer, serveur WMS qui permet à l'IGN de produire automatiquement la pyramide Scan Express au format raster tuilé à partir des bases de données vecteur. Nous les avons ensuite transformés au format compatible GeOxygene, plateforme de développement collaboratif de l'équipe COGIT de l'IGN [Bucher et al., 2012] que nous utiliserons pour produire nos représentations intermédiaires.

Déterminer la symbolisation des données géographiques **en amont du processus de généralisation** est essentiel. En effet, le processus de généralisation peut être amené à supprimer ou grossir des objets trop petits pour être lisibles, ou bien à les déplacer lorsqu'ils sont trop proches pour être discernables. Réaliser ces opérations sur la géométrie initiale des données plutôt qu'avec leur symbolisation finale présente donc le risque de manquer des conflits spatiaux, comme l'illustre la Figure 78.

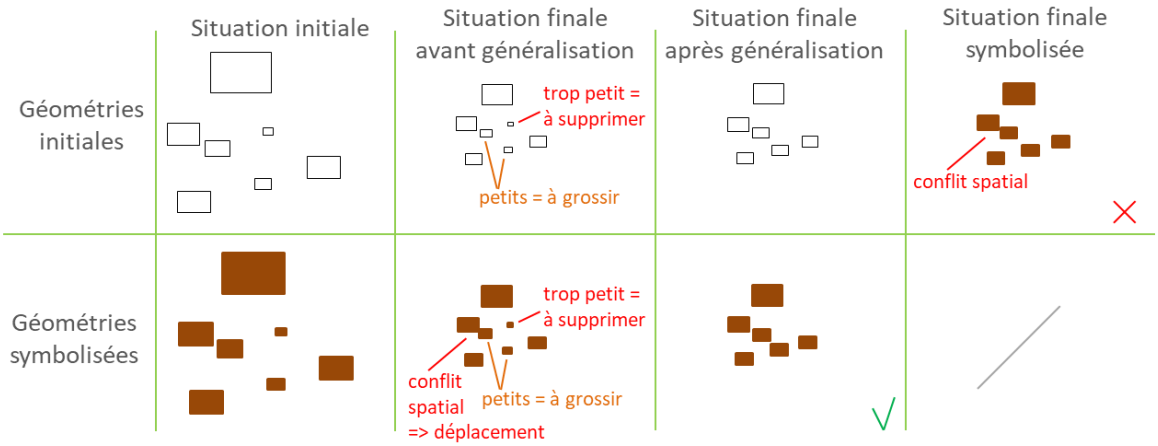


Figure 78. Illustration de la nécessité d'utiliser les géométries symbolisées dans le processus de généralisation cartographique, plutôt que les géométries initiales. Précisons que les seuils de lisibilité utilisés servent seulement à l'illustration sans être forcément justifiés à cette échelle.

La symbolisation d'une représentation cartographique doit être définie **en fonction de l'échelle visée**, car celle-ci détermine les seuils minimaux de lisibilité (taille et aire minimales, distance entre objets, etc.). De plus, la symbolisation de chacune des couches de données doit être définie **en fonction de la symbolisation du reste de la carte**. On peut ainsi jouer sur les contrastes entre la symbolisation des bâtiments et la couleur du fond de carte, pour améliorer leur lisibilité. Jouer sur l'épaisseur des symboles des routes permettra également de diminuer la quantité de bâtiments à déplacer ou éliminer parce qu'ils sont en conflit spatial avec les symboles de routes. Les travaux de [Samsonov et al., 2013] proposent ainsi de créer des représentations multi-échelles par simplification de la symbolisation. Comme ces travaux le soulèvent, nous pensons également qu'une combinaison **de généralisation et changement de symbolisation permettrait d'obtenir un résultat plus optimal**.

Dans notre cas, nous cherchons à produire des représentations cartographiques à plusieurs échelles. Nos choix de symbolisation seront donc contraints en plus par les symbolisations des représentations existantes. Nous **respecterons donc la légende *standard* du produit Scan Express**, en réutilisant les symboles existants pour les objets présents au 1 : 25k ou 1 : 100k, dans la mesure où nous pouvons garantir leur lisibilité. Pour représenter des bâtiments individuels et des aires urbaines en superposition, il serait en effet nécessaire de modifier légèrement la teinte de chacune de ces symbolisations, pour assurer un contraste suffisant à leur lisibilité. Nous pourrons également être amenés à créer de nouvelles symbolisations lorsque des étapes intermédiaires sont nécessaires.

Dans ce cas, nous essaierons dans la mesure du possible de **respecter le style de la légende existante** [Ory et al., 2013].

Pour chaque classe d'entités, nous essaierons ainsi de créer une **évolution cohérente et régulière de sa symbolisation en fonction de l'échelle**. Pour la plupart des objets, la symbolisation change uniquement en fonction d'une variable continue comme la taille d'un symbole ou l'épaisseur d'une ligne. Nous déterminerons donc leurs symbolisations intermédiaires en utilisant une **interpolation linéaire** entre les valeurs initiales et finales présentes dans les représentations existantes, comme utilisé dans [Ory et al., 2017] pour créer un continuum entre deux représentations au style différent (carte topographique IGN et OpenStreetMap). Nous appliquerons ainsi la formule suivante :

$$V_{interm} = V_{ini} + (éch_{interm} - éch_{ini}) * \frac{(V_{fin} - V_{ini})}{(éch_{fin} - éch_{ini})}$$

avec

- $éch_{interm}$ l'échelle de symbolisation visée pour cette représentation intermédiaire,
- $éch_{ini}$ l'échelle de symbolisation à laquelle la représentation initiale est définie,
- $éch_{fin}$ l'échelle de symbolisation à laquelle la représentation finale est définie,
- V_{ini} la valeur de cette variable de symbolisation dans la carte initiale,
- V_{fin} la valeur de cette variable de symbolisation dans la carte finale.

Pour certains cas rares, la symbolisation change de couleur ou de texture entre les représentations existantes. C'est le cas des routes secondaires qui changent de couleur comme nous l'expliquions dans la Figure 75. Nous choisissons ici de ne pas créer de représentations intermédiaires et de **laisser les changements apparaitre lors du passage de la dernière représentation intermédiaire à la carte au 1 : 100k**. Créer un continuum entre des représentations très hétérogènes est en effet un sujet de recherche complexe, traité par ailleurs par d'autres travaux de notre équipe de recherche [Hoarau 2015 ; Ory et al., 2017].

D.2.4. Généralisation des Représentations Intermédiaires

Pour produire nos représentations intermédiaires, nous avons utilisé le logiciel Qgis[1] et la plateforme GeOxygene[2], tous deux disponibles en open source. **Qgis** est un logiciel SIG permettant la visualisation, l'analyse et le traitement de données géographiques, stockées dans notre cas dans une base de données PostGIS. Il fournit aujourd'hui de nombreux outils diversifiés et relativement puissants, partagés sous forme de plugins. L'automatisation de processus y est également possible, via des scripts python notamment. Grâce à une large communauté de géomaticiens comme de thématiciens, son utilisation est relativement documentée et facile d'accès. Nous avons essentiellement utilisé Qgis pour visualiser et analyser nos données sources, mais aussi pour opérer des traitements attributaires ou géométriques simples, comme la correction interactive des géométries invalides. **GeOxygene** est quant à elle basée sur des technologies Java et open source et reprend les standards OGC/ISO. Elle est développée de manière collaborative par les membres de l'équipe de recherche COGIT de l'IGN [Bucher et al., 2012]. Nous avons utilisé en particulier le module **CartAGen**[3], qui capitalise les travaux de recherche en généralisation cartographique menés

[1] https://qgis.org/fr/site/forusers/index.html
[2] http://ignf.github.io/geoxygene/index.html
[3] https://github.com/IGNF/CartAGen

au COGIT [Renard et al., 2010]. Nous cherchons ici à utiliser des algorithmes de généralisation déjà implémentés et relativement automatiques, pour limiter le temps de production de notre matériel de test. Néanmoins, nous nous autorisons à implémenter si nécessaire d'autres algorithmes, décrits dans la littérature, voire à réaliser certaines opérations manuellement si nous ne parvenons pas à obtenir un résultat automatique satisfaisant.

Nous avons ainsi eu accès à l'implémentation existante de nombreux algorithmes de généralisation, dont l'efficacité a déjà été démontrée dans la littérature. Cependant, ces algorithmes sont pour la plupart optimisés pour un modèle de données, une échelle et un contexte géographique en particulier. D'une part, il a nous a donc été nécessaire de créer un chargeur de données du format Scan Express dans le schéma de données standard utilisé par les algorithmes de CartAGen. Ce chargeur s'appuie sur un fichier XML, décrivant les correspondances entre les tables PostGIS de notre base de données sources et les classes d'objets Java du modèle CartAGen, ainsi que l'appariement des attributs PostGIS aux propriétés Java. Ce chargeur est donc relativement générique et peu s'adapter à n'importe quel schéma source, à condition de fournir le fichier XML adéquat. D'autre part, pour utiliser les algorithmes existants dans notre cas d'étude, nous avons dû parfois **adapter leur paramétrage sinon leur implémentation**, notamment à l'échelle visée. De plus, le temps d'exécution des algorithmes disponibles peut être très long et la taille de la zone géographique que nos machines sont capables de traiter est limitée. Notre zone d'étude dépasse ainsi ces capacités pour les algorithmes plus complexes, utilisés pour la généralisation du routier et du bâti. Nous avons donc choisi de **la découper en trois parties**, illustrées par la Figure 79 et traitées indépendamment dans le processus. Nous avons découpé notre zone selon le tracé de deux rivières, la Nivelle (à gauche) et la Nive (à droite). Cette **séparation naturelle** entre les différentes parties de la zone d'étude facilite la réconciliation des données généralisées a posteriori, car seuls les ponts routiers se retrouvent à cheval sur ces frontières. Cette stratégie suffit dans notre cas, mais sur une zone géographique plus étendue, il faudrait utiliser des méthodes de calcul distribué [Touya et al., 2017] qui permettent de lancer l'exécution d'un même processus sur plusieurs régions distinctes en parallèle.

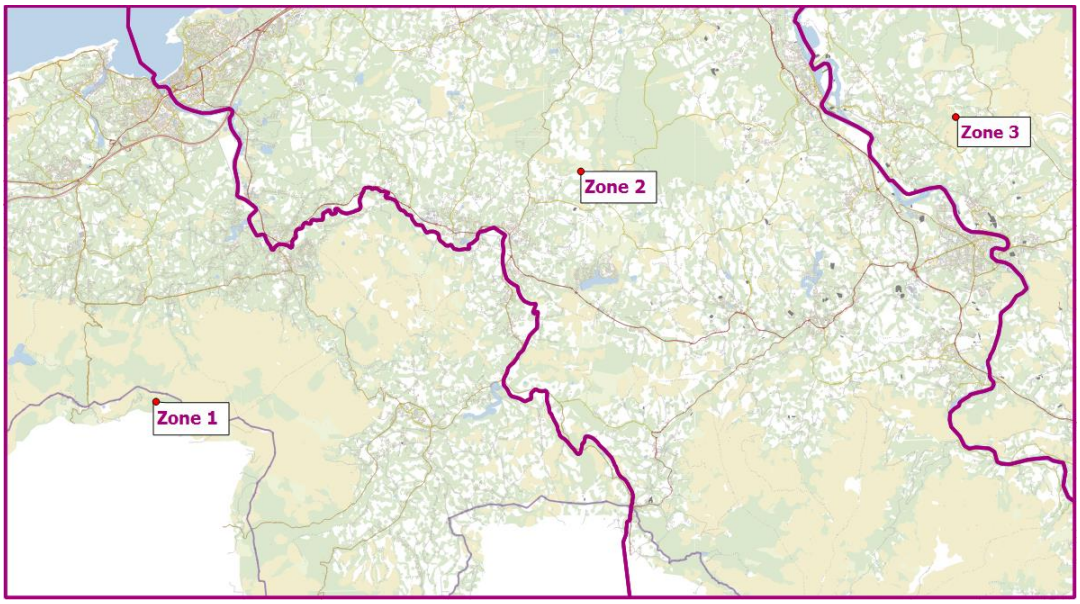


Figure 79. Découpage (en violet) de notre zone d'étude en trois parties pour pallier aux limites des capacités des algorithmes de généralisation du routier et du bâti.

D'une manière générale, bien que les algorithmes de généralisation que nous ayons utilisés soient généralement automatiques, leur **enchainement a été fait manuellement**. N'ayant pas de connaissances solides sur lesquelles nous appuyer pour leur paramétrage ou leur orchestration aux échelles intermédiaires, nous avons testé de nombreux paramétrages de chaque algorithme et différents enchainements d'algorithmes, pour obtenir un résultat final satisfaisant. Comme mentionné précédemment, nous avons choisi de dériver les représentations intermédiaires selon le principe de dérivation en échelle [Stoter 2005], c'est-à-dire l'une après l'autre, de la plus détaillée à la moins détaillée, pour préserver leur cohérence. Précisons ici que même si nous prenons le résultat du niveau intermédiaire précédent pour produire une nouvelle représentation, **nous prenons également en compte les caractéristiques des données sources**, par exemple la densité du bâti initial, pour éviter un effet de lissage au fil des échelles.

En termes d'évaluation, nous avons pris en compte les quatre contraintes énoncées précédemment dans cette thèse, que doit respecter le contenu de nos représentations intermédiaires :

- être **lisible** sur l'intervalle d'échelles d'affichage visé ;
- avoir un **degré de généralisation adapté** à l'intervalle d'échelles d'affichage visé ;
- être **cohérent** avec les autres représentations existantes ;
- **évoluer de manière progressive** au regard du contenu des autres représentations existantes.

Le respect de la contrainte de lisibilité a **été intégré directement dans l'implémentation de certains algorithmes**, en paramétrant les tailles et distances minimales des objets en fonction de l'échelle. Une **analyse visuelle** nous a permis de compléter cette vérification, mais aussi de nous assurer de l'adéquation du degré de généralisation choisi vis à vis de l'intervalle d'échelles d'affichage visé, indépendamment pour chacune des représentations intermédiaires.

En ce qui concerne la contrainte de **cohérence**, le contenu d'une représentation intermédiaire doit être cohérent avec les représentations existantes à plus grande et plus petite échelle. Les objets présents dans la représentation intermédiaire **doivent avoir un homologue dans la représentation existante à plus grande échelle** (au 1 : 25k ici). Lorsque l'on produit plusieurs représentations intermédiaires, cette contrainte s'applique aussi avec la représentation intermédiaire précédente. Cette contrainte est vérifiée de fait par nos processus de généralisation puisque l'on repart systématiquement de celle-ci. A l'inverse, tous les objets présents dans la représentation existante à plus petite échelle (au 1 : 100k ici) **doivent être préservés dans les représentations intermédiaires**. Pour prendre en compte cette contrainte dans le processus de généralisation, nous devons apparier les objets entre les deux cartes existantes, pour détecter les objets homologues et les marquer comme devant être préservés. La difficulté réside ici dans la différence de niveaux de détail et de données sources entre ces deux cartes. Un processus d'appariement multicritères [Olteanu-Raimond et al., 2015] aurait sans doute été utile ici, mais il nous a semblé moins coûteux de vérifier cette contrainte a posteriori (§A.2.4), c'est-à-dire après avoir produit toutes les représentations intermédiaires. Nous avons ainsi identifié les objets présents au 1 : 100k qui avaient disparu dans les représentations intermédiaires et les avons restaurés. Nous avons appliqué cette méthode par manque de temps, mais il est clair qu'elle ne permet pas de prendre en compte la cohérence des changements appliqués, par exemple des déplacements d'objets. Pour affiner nos résultats, nous avons corrigé manuellement les erreurs de ce type que nous avons pu détecter.

Enfin, en ce qui concerne la contrainte de progressivité, nous avons ponctuellement utilisé des

mesures analytiques pour affiner l'évolution du contenu de nos représentations intermédiaires. Nous avons par exemple calculé l'évolution de la longueur ou de l'aire totale des objets entre les différentes échelles. Ces indicateurs nous ont permis d'ajuster nos processus de généralisation, mais nous nous sommes essentiellement appuyés sur une **analyse visuelle de la pyramide résultante pour valider la progressivité de simplification**. Nous avons ainsi navigué d'une échelle à l'autre pour déterminer si les changements entre représentations nous semblaient réguliers. Lorsque ce n'était pas le cas, selon le coût de la modification, nous avons corrigé la généralisation du contenu cartographique en utilisant un nouveau paramétrage, modifié l'intervalle d'échelles d'affichage pour optimiser son adéquation avec le degré de généralisation ou bien simplement modifié la symbolisation des données pour affiner l'aspect visuel de la représentation. Il nous est donc ici apparu que ces trois leviers permettaient d'améliorer le résultat, tout en étant très liés. Pour produire une pyramide multi-échelle, **il pourrait être intéressant pour un producteur cartographique de disposer d'une interface où l'on puisse jouer sur ces paramètres, à la volée**. Malheureusement, les capacités de généralisation à la volée sont encore limitées à des algorithmes simples (filtrage de points, lissage de lignes). Dans notre cas, nous avons donc amélioré au mieux la qualité de nos résultats, dans la limite du temps disponible.

Nous avons donc choisi de produire trois représentations intermédiaires pour simplifier la transition existante entre nos cartes initiales au 1 : 25k et au 1 : 100k. Comme expliqué précédemment, nous avons choisi de produire plusieurs pyramides différentes en **faisant varier la représentation du thème bâti**, comme nous le présentons dans la partie §D.4. Pour chacun des autres thèmes que nous utilisons, dits *invariants*, nous présentons dans la partie suivante **les choix de symbolisation et les processus de généralisation utilisés pour produire nos 3 représentations intermédiaires**.

D.3. Représentations Intermédiaires pour les Thèmes Invariants

Dans cette partie, nous détaillons **la symbolisation et les processus de généralisation utilisés** pour créer trois représentations intermédiaires pour chacun des thèmes géographiques utilisés dans notre matériel de test. Par ordre d'affichage, nous traiterons donc ici les thèmes de l'hydrographie (§D.3.1), de l'occupation du sol et de la végétation (§D.3.2), des structures publiques non bâties (§D.3.3), des limites administratives (§D.3.4), du réseau de voies ferrées (§D.3.5) et du réseau routier (§D.3.6).

D.3.1. Hydrographie

Nous avons choisi deux couches de la base de données Scan Express initiale pour représenter l'hydrographie dans notre matériel de test. La table *surface_d_eau_25* représente l**es surfaces d'eau, bassins et zones marines** en implantation surfacique. Après avoir identifié et isolé les objets ayant un homologue dans la carte au 1 : 100k, nous avons appliqué une **sélection selon un seuil d'aire minimale**, variant progressivement avec l'échelle. Ces seuils ont été déterminés de manière empirique en vérifiant visuellement la surface minimale lisible et utile aux différents intervalles d'affichage visés. Précisons ici que nous choisissons cette méthode relativement grossière car la quantité et la complexité des surfaces d'eau sur notre zone d'étude sont assez limitées. La Figure 80 présente l'évolution de la surface totale de ces étendues d'eau (hors zones marines) entre les différentes représentations produites et existantes. Ici, nous aurions visiblement pu choisir des seuils de taille minimale plus discriminants pour accélérer la diminution de la surface totale. Néanmoins, sélectionner uniquement sur un critère de taille minimale est une approche contestée, car elle ne prend pas en compte la saillance des petits objets éliminés, comme un lac isolé ou avec une forme

particulière. Il faudrait ici préserver ces éléments saillants à plus petite échelle, en les grossissant pour assurer leur lisibilité. Utiliser des seuils moins discriminants nous permet indirectement de préserver ces objets, tout en utilisant un processus de généralisation très simple et rapide. La symbolisation de cette couche est identique dans les deux représentations existantes et n'est donc pas modifiée dans les représentations intermédiaires.

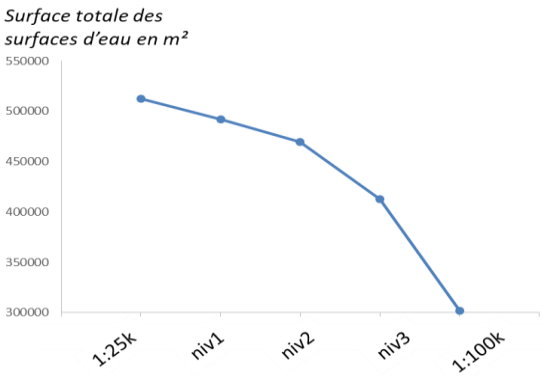


Figure 80. Variation de la surface totale des surfaces d'eau (hors zones marines) en fonction de la représentation cartographique.

La table *troncon_cours_d_eau_25* représente quant à elle les canaux, ainsi que les cours d'eau permanents et temporaires. Nous avons ici encore commencé par identifier et isoler les tronçons hydrographiques ayant un homologue dans la carte au 1 : 100k, par sélection spatiale et complétion manuelle. Puis nous avons appliqué un **algorithme de sélection relativement simple, basé sur le découpage des tronçons sans issue du réseau hydrographique en plusieurs éléments distincts.** On éliminera ainsi en priorité les *feuilles* ou tronçons secondaires, qui ne sont pas liées directement au réseau principal, comme illustré sur la Figure 81. Nous utilisons ici un critère de sélection basé sur **la longueur** des *feuilles*, de plus en plus grand au fil des échelles. Cette méthode reprend les principes de base des travaux de [Horton 1945 ; Strahler 1952] en éliminant en premier lieu les tronçons les plus éloignés du réseau principal en termes de connectivité. D'autres algorithmes auraient pu donner de meilleurs résultats visuels ici, notamment celui de [Thomson et Brooks, 2000] qui prend en compte le principe de continuité visuelle, mais dont l'implémentation aurait été plus coûteuse.

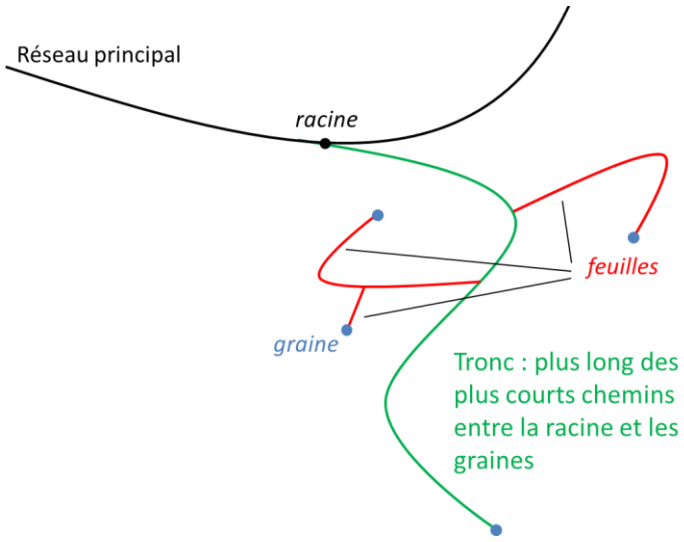


Figure 81. Structure utilisée pour sélectionner les *feuilles* du réseau hydrographique.

Pour évaluer et paramétrer ce processus de sélection, nous avons notamment étudié la **variation de la longueur totale du réseau hydrographique**, illustrée par la Figure 82. Précisons ici qu'étudier la variation du nombre d'objets sélectionnés n'est pas pertinent dans notre cas, car les données sources sont différentes entre les représentations existantes : elles ne sont pas découpées de la même façon et chaque objet n'est pas modélisé avec la même précision et résolution géométrique. Les résultats de notre processus de généralisation pour le réseau hydrographique sont présentés dans la Figure 83, en comparaison avec les représentations existantes au 1 : 25k et au 1 : 100k.

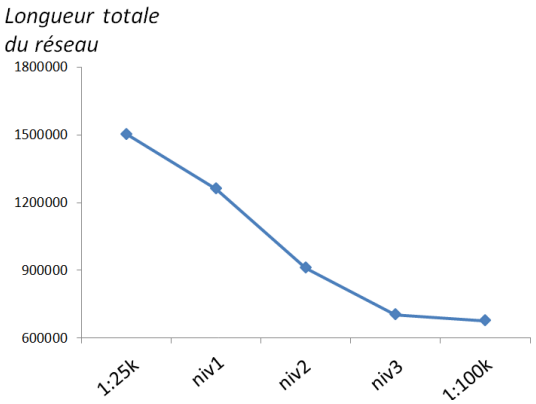


Figure 82. Variation de la longueur totale du réseau hydrographique en fonction de la représentation cartographique.

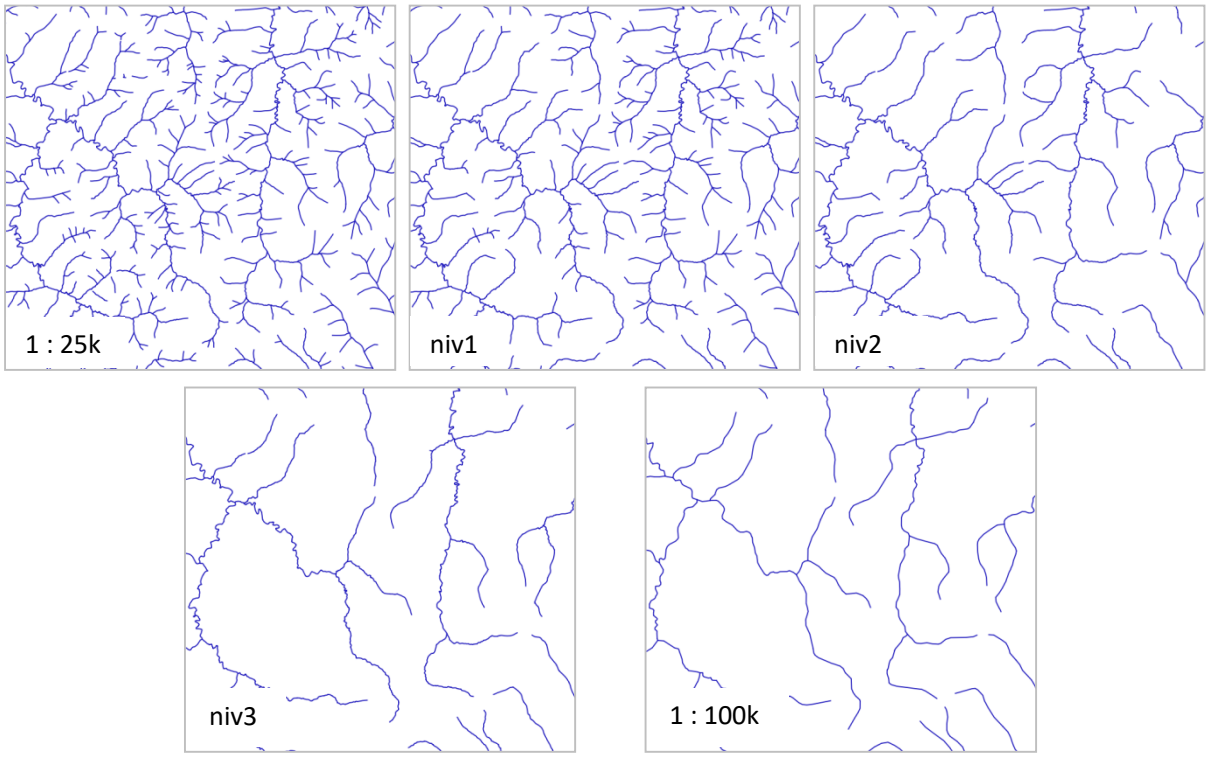


Figure 83. Résultats de notre processus de généralisation pour le réseau hydrographique.

En observant visuellement les résultats, il nous semble que **la diminution de la longueur du réseau hydrographique est relativement progressive** jusqu'au niveau 3, mais qu'elle est quasi nulle entre cette dernière représentation intermédiaire et la représentation existante au 1 : 100k, où la sinuosité des tronçons hydrographiques est par contre très simplifiée (Figure 83). Par manque de temps, nous n'avons pas intégré de simplification de la géométrie dans notre processus de généralisation du

réseau hydrographique. Il nous a donc semblé pertinent de garder le paramétrage de la sélection en l'état, pour que cette simplification soit plus compréhensible de l'utilisateur. Nous partons ici de l'hypothèse que décorréler une transformation de niveaux de détail en plusieurs opérations (sélection, simplification) successives est plus facile à appréhender qu'une transformation simultanée. Cette hypothèse s'appuie sur l'idée des transitions animées par étapes [Heer et Robertson, 2007] déjà présentée en §A.3.1.

D.3.2. Occupation du Sol et Végétation

Nous avons choisi deux couches de la base de données Scan Express initiale pour représenter **l'occupation du sol et la végétation**. La couche *nature_du_sol_25* décrit la nature du sol nu, en particulier sur notre zone d'étude les étendues rocheuses et sableuses. Elles sont essentiellement concentrées autour de la baie de Saint-Jean-de-Luz. La couche *vegetation_25* décrit quant à elle plus largement la nature des terres boisées, détaillées en type de couvert forestier. Sur notre zone d'étude on trouvera ainsi les types suivants : vigne, verger, haie, bois, forêt fermée, forêt ouverte et lande ligneuse. Ces deux couches utilisent une implémentation surfacique, mais leurs objets ne forment pas une partition de l'espace cartographique. Les processus de généralisation par agrégation proposés dans la littérature tels que [Šuba et al., 2014 ; Peng et al., 2017] ne sont donc pas spécifiquement adaptés ici. De plus, nous avons identifié et isolé les objets ayant un homologue dans la carte au 1 : 100k, particulièrement nombreux pour ce thème encore très présent à moyenne échelle. Nous avons donc choisi de regrouper les objets de même nature qui se touchent en unissant leurs géométries, pour traiter en priorité les objets isolés, puis d'appliquer une simple **sélection basée sur un critère de surface minimale** pour éliminer les petits objets devenus illisibles.

Par ailleurs, la légende utilisée pour ces classes d'objets cartographiques est illustrée par la Figure 84 et ne varie pas entre les cartes existantes au 1 : 25k et au 1 : 100k, excepté la densité des textures pour la couche *nature_du_sol* qui diminue en même temps que l'échelle. Pour représenter ces données aux échelles intermédiaires, nous conservons donc ces symbolisations telles quelles, en adaptant simplement la taille des motifs pour la couche *nature_du_sol*. La variation de symbolisation qui en résulte est illustrée dans la Figure 85 pour le sable humide, pour une même emprise.

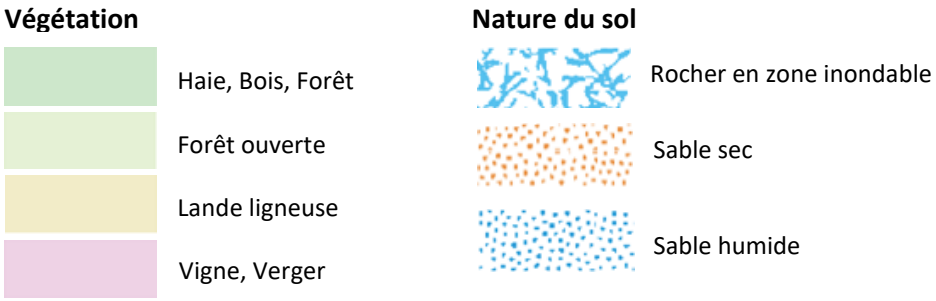


Figure 84. Légende des données cartographiques représentant la nature du sol et la végétation sur notre zone d'étude, utilisée à toutes les échelles de notre pyramide.

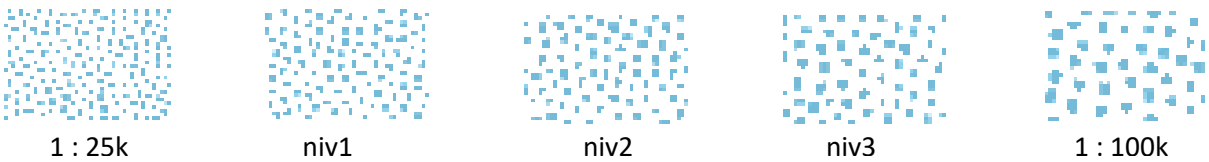


Figure 85. Variation de symbolisation pour le sable humide à différentes échelles : la taille du motif augmente et la densité diminue en même temps que l'échelle, pour créer une transition progressive.

D.3.3. Structures publiques non bâties (cimetières, terrains de sport)

En plus de cette occupation du sol naturelle et des zones de construction bâties que nous évoquerons plus tard, nous avons souhaité intégrer à notre matériel de test les couches *cimetiere_25* et *terrain_de_sport_25*. Les structures publiques éponymes sont relativement faciles à localiser dans l'espace car indiquées par la signalisation routière, reconnaissables si l'on passe devant et bien connues des autochtones si l'on demande son chemin. Elles peuvent donc servir de points de repère dans des tâches de navigation. Dans notre cas, elles peuvent également servir de **points de repère dans des tâches de navigation cartographique**, car leur symbolisation est facilement reconnaissable et relativement saillante, comme le montre la Figure 86.

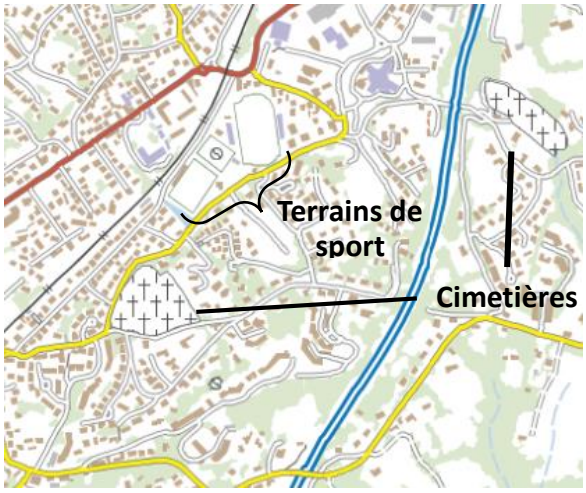


Figure 86. La représentation des cimetières et terrains de sport est facilement reconnaissable et relativement saillante dans la carte existante au 1 : 25k.

Ces objets n'étant plus présents dans la carte existante au 1 : 100k, nous avons choisi de les faire disparaitre progressivement dans les représentations intermédiaires, dès qu'ils n'étaient plus lisibles. Nous avons donc appliqué une **sélection basée sur un critère de surface minimale**, avec un seuil progressif au fil des représentations intermédiaires, déterminé de manière empirique. En ce qui concerne la symbolisation de ces objets, les terrains de sport sont représentés par un polygone ayant un fond blanc et un contour vert, dont nous avons fait **varier l'épaisseur** pour qu'elle reste lisible au fil des échelles. Les terrains de tennis en particulier sont signalés en plus par un pictogramme très rapidement illisible ou si l'on augmente sa taille, plus cohérent avec l'emprise du terrain. Nous avons donc choisi de le faire disparaitre après la première représentation intermédiaire. Enfin les cimetières sont représentés par un motif de croix, dont nous avons fait **varier la taille et donc la densité** au fil des échelles, comme le montre la Figure 87.

Figure 87. Variation de la symbolisation des cimetières à différentes échelles : la taille des motifs augmente donc la densité diminue avec au fil des échelles pour assurer leur lisibilité. Les cimetières ne sont pas représentés dans la carte existante au 1 : 100k.

D.3.4. Limites administratives

Les limites administratives permettent de structurer le territoire et donc sa représentation cartographique, qu'elle soit topographique ou thématique. Nous avons donc choisi d'inclure ce thème et en particulier la couche *limite_administrative_25* dans notre matériel de test. Sur notre zone d'étude, nous représenterons ainsi les **limites de communes, de cantons et d'état**, puisque notre zone est bordée au sud par la frontière entre la France et l'Espagne. Tous les objets présents dans la carte existante au 1 : 25k l'étant aussi dans la carte au 1 : 100k et leur géométrie n'étant pas particulièrement simplifiée, nous n'appliquons aucun processus de généralisation sur ces données. En revanche, nous grossissons leur symbolisation pour qu'elle reste lisible et soit à peu près équivalente à l'écran aux différentes échelles d'affichage (même taille sur la carte mais taille de terrain couverte plus importante). La Figure 88 présente ainsi la variation de la symbolisation des limites de communes, ici visualisée à même échelle pour voir l'évolution.

Figure 88. Variation de la symbolisation des limites administratives de communes, vues à même échelle ici.

D.3.5. Réseau de Voies Ferrées

Nous choisissons d'intégrer le réseau de voies ferrées (couche *troncon_voie_ferree_25*) à notre matériel de test, car il est particulièrement saillant sur les cartes Scan Express et qu'il peut donc servir de point de repère. Seules trois voies ferrées distinctes sont présentes dans notre zone d'étude, avec une géométrie initiale assez simple. Nous choisissons donc de **ne pas appliquer de processus de généralisation ici et de ne modifier que leur symbolisation**, que l'on grossie comme l'illustre la Figure 89, pour qu'elle reste lisible et soit à peu près équivalente à l'écran aux différentes échelles d'affichage.

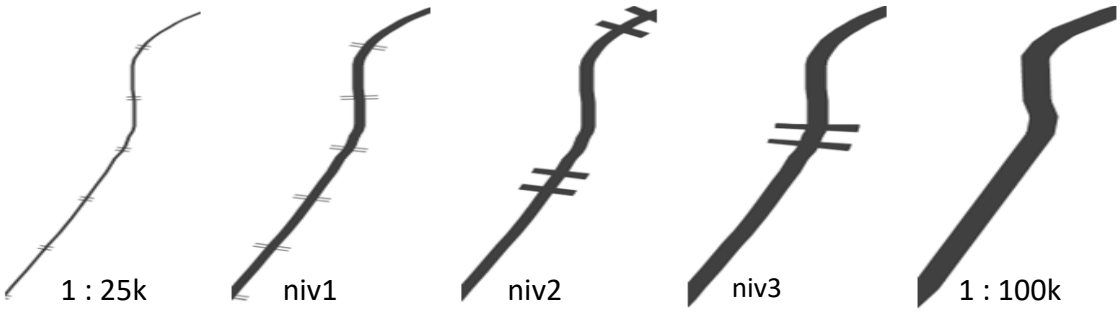


Figure 89. Variation de la symbolisation du réseau de voies ferrée, vues à même échelle ici.

D.3.6. Réseau routier

Les données du réseau routier sont principalement décrites par trois tables dans les données sources Scan Express : *troncon_chemin_25, pont_route_25* et *troncon_de_route_25*. Ces données sont notamment spécifiées par un attribut *nature*, indiquant leur importance dans le réseau routier.

La table *troncon_chemin_25* reprend les axes où la circulation automobile n'est pas permise, c'est-à-dire de *nature* **chemin, sentier, piste cyclable ou escalier**. Parmi ces données, seuls les itinéraires de randonnée les plus importants sont présents dans la carte au 1 : 100k, car ajoutés avec la surcouche touristique. Pour simplifier notre matériel de test en vue de notre expérience, nous avons choisi de ne pas intégrer cette surcouche et ne ferons donc pas figurer ces itinéraires au 1 : 100k. Nous choisissons ici de ne faire apparaitre **cette couche de données qu'à la première représentation intermédiaire**, où aucune généralisation n'est nécessaire pour assurer sa lisibilité. Nous aurions pu les représenter à plus petite échelle en les simplifiant, mais nous craignions d'obtenir un résultat incohérent avec le niveau de détail du réseau routier principal.

La table *pont_route_25* reprend initialement les **ponts routiers**, c'est-à-dire les voies de circulation passant au-dessus d'autres voies de circulation ou de tronçons hydrographiques. La table principale *troncon_de_route_25* contient l'ensemble des voies de circulation, excepté les ponts. Cette différenciation en deux tables distinctes permet de préserver l'agencement vertical réel dans la superposition des symboles de routes sur la carte, géré dans le fichier de symbolisation SLD. Cependant, elle pose problème quand il s'agit de généraliser le réseau routier, puisque les algorithmes qui le simplifient le font sur des critères globaux et doivent donc prendre en compte simultanément tous les tronçons. Nous avons donc fusionné ces deux tables le temps du processus de généralisation, puis les avons séparés à nouveau pour l'affichage.

Concernant la symbolisation du réseau routier, comme déjà mentionné nous avons rencontré quelques hétérogénéités entre les cartes existantes au 1 : 25K et au 1 : 100k. Nous choisissons ici d'homogénéiser la représentation des autoroutes dans les données sources, mais de conserver le changement de couleurs de certaines routes (de jaune vers blanc) dû à l'utilisation d'une classification différente. Nous laisserons apparaitre ces changements spécifiquement entre la troisième représentation intermédiaire et la carte au 1 : 100k. Les symbolisations des représentations intermédiaires sont donc une **reprise fidèle de la symbolisation du 1 : 25k, excepté pour la largeur des routes qui varie au fil des échelles pour créer une transition progressive entre les largeurs utilisées dans les cartes existantes**.

Concernant la généralisation du réseau routier, nous avons choisi d'utiliser **une opération de sélection des tronçons routiers basée sur leur importance, avec un seuil progressif au fil des échelles**. Il est ici important de prendre en compte la densité initiale du réseau routier pour préserver ses caractéristiques principales après généralisation. De plus, différentes transformations doivent souvent être appliquées selon le contexte géographique (urbain ou rural) et le type de routes traité. Il est donc particulièrement utile d'enrichir les données sources avant de les généraliser [Plazanet 1996], pour disposer de ces caractéristiques. Pour cela, nous avons utilisé des algorithmes issus du modèle CollaGen de [Touya 2011], déjà implémentés dans CartAGen.

Nous avons ainsi enrichi nos données initiales en détectant les **jonctions complexes** du réseau, illustrées par la Figure 90, comme les pattes d'oie ou les ronds-points. Ces structures spécifiques doivent être connues de notre processus de sélection, pour être traitées comme un groupe d'objets et ne pas subir une suppression partielle. La détection de ces objets se base sur une analyse géométrique des faces de la carte topologique construite à partir du réseau routier, en particulier sur les faces triangulaires pour les pattes d'oie [Grosso 2004] et les faces dont l'indice de Miller sur la compacité d'une surface est important (4π*aire/périmètre^2 > 0.97) pour les ronds-points [Sheeren et

al., 2004]. Ces structures sont généralisées par une opération de « ***collapse*** » quand l'échelle ne permet plus leur lisibilité, c'est-à-dire un changement d'implantation géométrique [Regnauld et McMaster, 2007]. Les pattes d'oie sont ainsi agrégées en un seul tronçon routier et les ronds-points sont remplacés par un point. Les seuils de sélection des structures complexes à simplifier sont calculés à partir de la taille de la surface vide visible au milieu des tronçons symbolisés de la structure : si la surface vide est trop petite pour être lisible, la structure subit un collapse. Les autres types de structures complexes comme les bretelles et échangeurs d'autoroute, plus difficiles à traiter, ont été généralisées manuellement car peu nombreuses sur notre zone d'étude. Nous nous sommes alors efforcés de représenter en priorité la topologie du réseau, plutôt que la forme topographique de ces tronçons, comme présenté en §B.4.4.

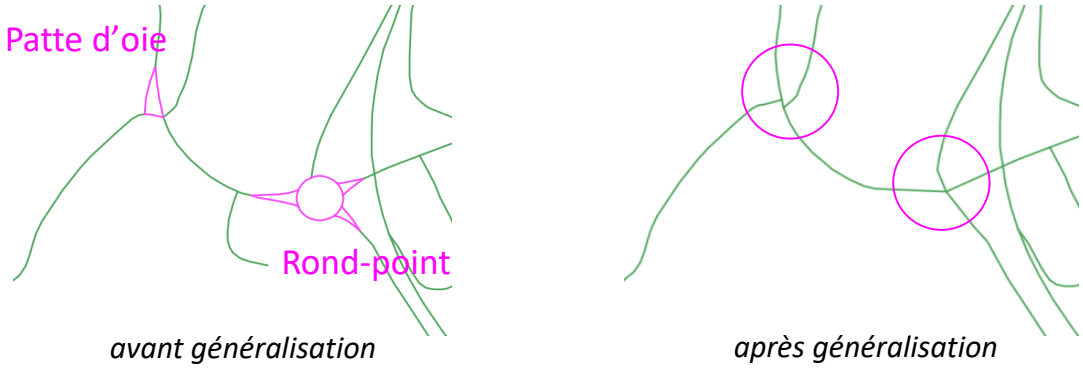


Figure 90. Illustration de jonctions complexes du réseau routier en mauve, comme une patte d'oie à gauche, ou un rond-point à droite.

Une fois ces structures complexes traitées, nous avons choisi de traiter différemment le reste du réseau routier en zone urbaine ou rurale, pour préserver sa densité initiale mais aussi parce que les algorithmes que nous utilisons sont optimisés pour un contexte géographique en particulier. Pour identifier les espaces urbains, nous avons utilisé un algorithme disponible dans CartAGen [Boffet 2001], qui applique un *buffer* aux objets bâtis et isole les zones urbaines compactes dont la surface est supérieure à une aire minimale. Dans la suite de cette thèse, nous considérerons le reste de l'espace comme un espace rural, bien que ces notions ne forment pas théoriquement une partition de l'espace. La méthode décrite ci-après est reprise des travaux de [Touya 2010], les différents algorithmes nécessaires étant déjà disponibles dans CartAGen.

Pour généraliser les routes en **espace rural**, nous avons ainsi appliqué l'algorithme illustré par la Figure 91, en utilisant trois méthodes de **sélection** basées sur l'importance de chaque tronçon, en prenant en compte :

- sa **nature** renseignée par un attribut dans les données sources, sur lequel est aussi basée sa symbolisation ;
- la longueur du « **stroke** » auquel il appartient, c'est-à-dire le segment visuellement continu calculé selon la méthode de [Thomson et Richardson, 1999] ;
- le nombre de **plus courts chemins** reliant des infrastructures bâties (mairies, hôpitaux, gares etc.) qui l'empruntent.

Les tronçons qui ne sont sélectionnés par aucune de ces trois méthodes sont éliminés, **si et seulement si leur disparition ne déconnecte pas une partie du réseau**. Pour cela, nous comparons le nombre de composantes connexes du réseau, avant et après sélection de chaque tronçon éliminé.

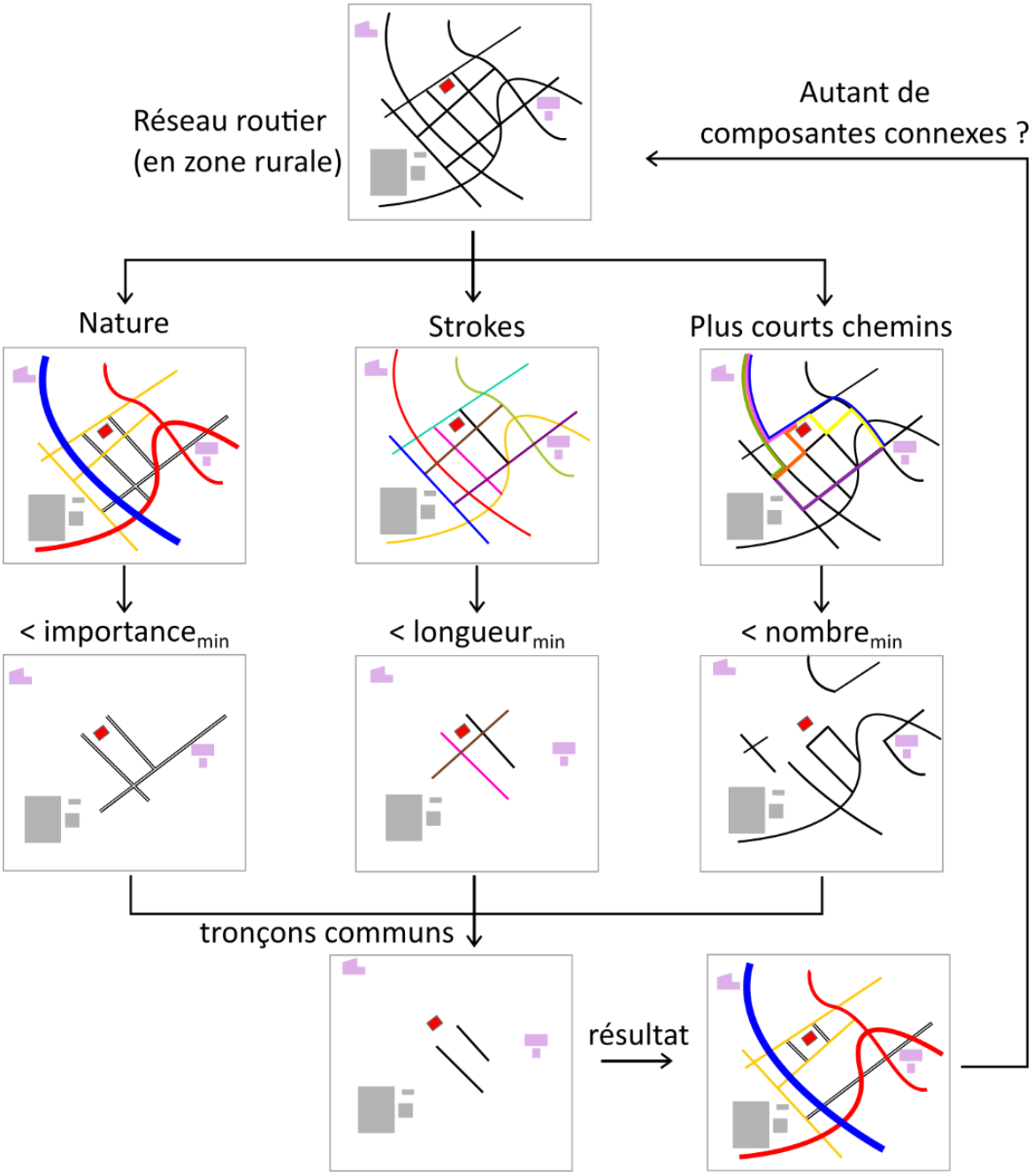


Figure 91. Illustration de l'algorithme de sélection utilisé pour le réseau routier en zone rurale.

Pour généraliser les routes en **espace urbain** cette fois, nous avons utilisé la méthode d'agrégation des ilots urbains issue des travaux de [Ruas 1999 ; Touya 2010]. Cet algorithme considère les faces du réseau routier, c'est-à-dire les ilots urbains, et se base sur une fonction calculant le coût de l'agrégation. Il propose ainsi **d'agréger des ilots voisins en éliminant les tronçons qui les séparent**, jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit rempli, soit que tous les ilots urbains soient plus grands que la taille minimum choisie, soit que le coût d'agrégation soit trop important pour tous les ilots restants. La Figure 92 illustre le principe de cet algorithme. La sélection des ilots à agréger est géographiquement limitée par une partition de l'espace urbain (en mauve), basée sur les axes routiers majeurs identifiés d'après l'attribut *nature*. Dans chacune de ces parties, on commence par traiter le plus petit ilot urbain (en rouge) et on choisit parmi les ilots voisins (en noir) celui à agréger, c'est-à-dire celui qui minimise la fonction de coût de l'agrégation (ici en vert). Expliqué simplement,

le principe de cette fonction est le suivant : plus la route séparatrice est importante dans le réseau (nature, centralité, longueur du stroke, etc.) et plus les ilots urbains sont différents (surface, densité, forme, etc.), plus le coût d'agrégation sera important.

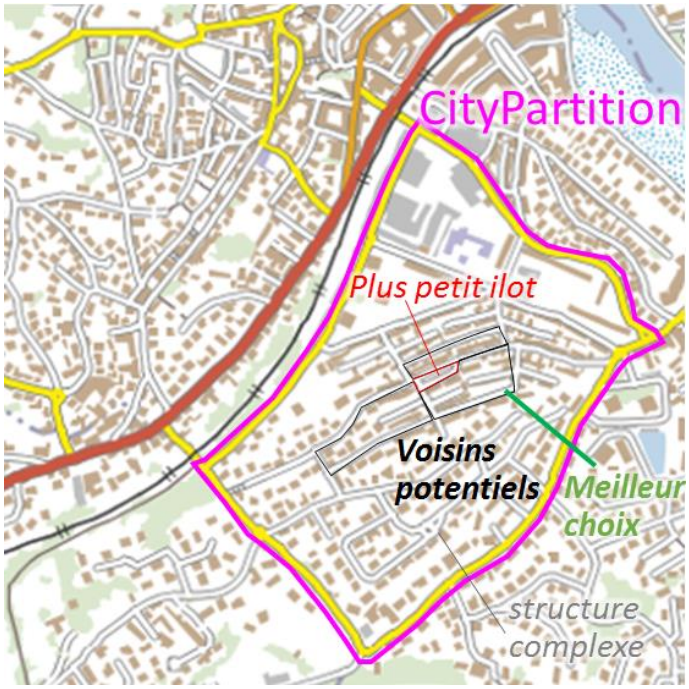


Figure 92. Illustration du principe de l'algorithme de généralisation du routier en espace urbain par agrégation d'ilots [Ruas 1999 ; Touya 2010]. Ici le plus petit ilot (hors structures complexes déjà traitées) est identifié en rouge. Parmi ses voisins potentiels (en noir), le meilleur choix minimise la fonction de coût d'agrégation.

Une fois chacun de ces traitements appliqués aux espaces urbains d'une part et ruraux d'autre part, il est nécessaire de vérifier la **continuité du réseau aux interfaces entre les différents types d'espace** [Touya 2010]. Les tronçons routiers concernés, en intersection avec les limites des zones urbaines, ont été pris en compte dans chacun des espaces. Pour vérifier la connectivité aux interfaces, nous avons simplement identifié ceux parmi ces tronçons qui n'étaient éliminés que par un seul des deux traitements et les avons conservés dans le résultat final.

En observant les résultats de ces processus, essentiellement basés sur la connectivité du réseau, nous avons observé une élimination très importante **des impasses** en général, simplifiant drastiquement la complexité visuelle du réseau routier. Pour préserver au mieux les caractéristiques des données initiales, nous avons utilisé un traitement spécifique pour la sélection des impasses. Pour cela, nous avons préservé d'une part les impasses importantes en nous basant sur les critères utilisés précédemment en espace rural. D'autre part, en nous inspirant de [Ruas 1999], nous avons conservé toutes les impasses dont la **longueur était supérieure à un seuil spécifique**, variable en fonction de l'échelle, en utilisant le même algorithme que pour la généralisation du réseau hydrographique. Dans le cas des groupes d'impasses complexes, nous avons traité chaque feuille indépendamment comme pour les cours d'eau (cf. Figure 81). Quelques groupes d'impasses ont cependant dû être traités manuellement, cet algorithme ne traitant pas encore correctement les cycles, comme dans l'exemple de la Figure 93 (en mauve). Par manque de temps et ayant peu d'espaces urbains à traiter, nous n'avons pas dissocié le paramétrage de cet algorithme en fonction

du contexte géographique. Une amélioration de ces résultats pourraient donc être de prendre en compte la densité locale du réseau comme préconisé par [Ruas 1999].

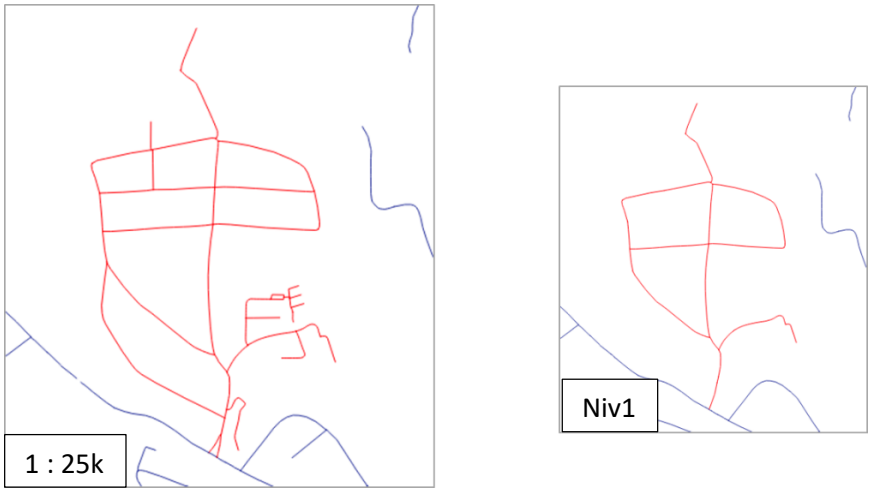


Figure 93. Illustration d'un groupe d'impasses présentant des cycles et devant encore être traité manuellement (en rouge).

Une navigation dans les résultats obtenus à différente échelle nous a permis de contrôler la progressivité de simplification au fil des échelles. Pour **évaluer ces résultats**, nous avons aussi étudié la variation de la longueur totale du réseau routier, assez progressive ici comme illustrée par la Figure 94.

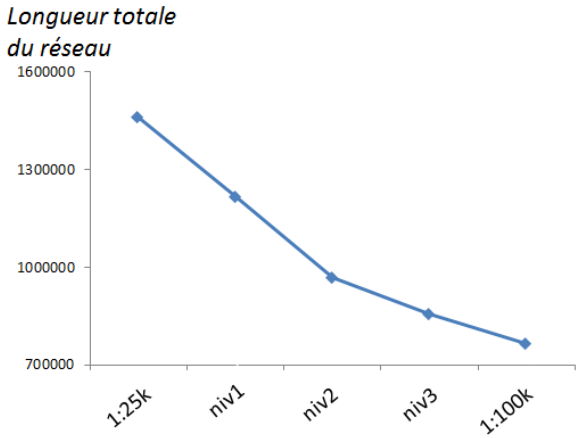


Figure 94. Variation de la longueur totale du réseau routier au fil des représentations.

Enfin, nous avons réalisé des **corrections manuelles** pour améliorer la préservation des structures caractéristiques du réseau, par exemple des zones résidentielles présentant un quadrillage géométrique, car nous ne disposions pas d'un algorithme de typification déjà implémenté tel que [Savino et al., 2011]. Nous avons aussi simplifié et déplacé manuellement les axes routiers majeurs qui subissaient des changements de géométrie importants entre les représentations existantes au 1 : 25k et au 1 : 100k. Enfin, nous avons homogénéisé la simplification des tronçons à une même échelle, lorsque nous avons identifié des situations non cohérentes. Finalement, les Figure 95 et Figure 96 présentent respectivement les résultats de notre processus de généralisation en zone urbaine et rurale.

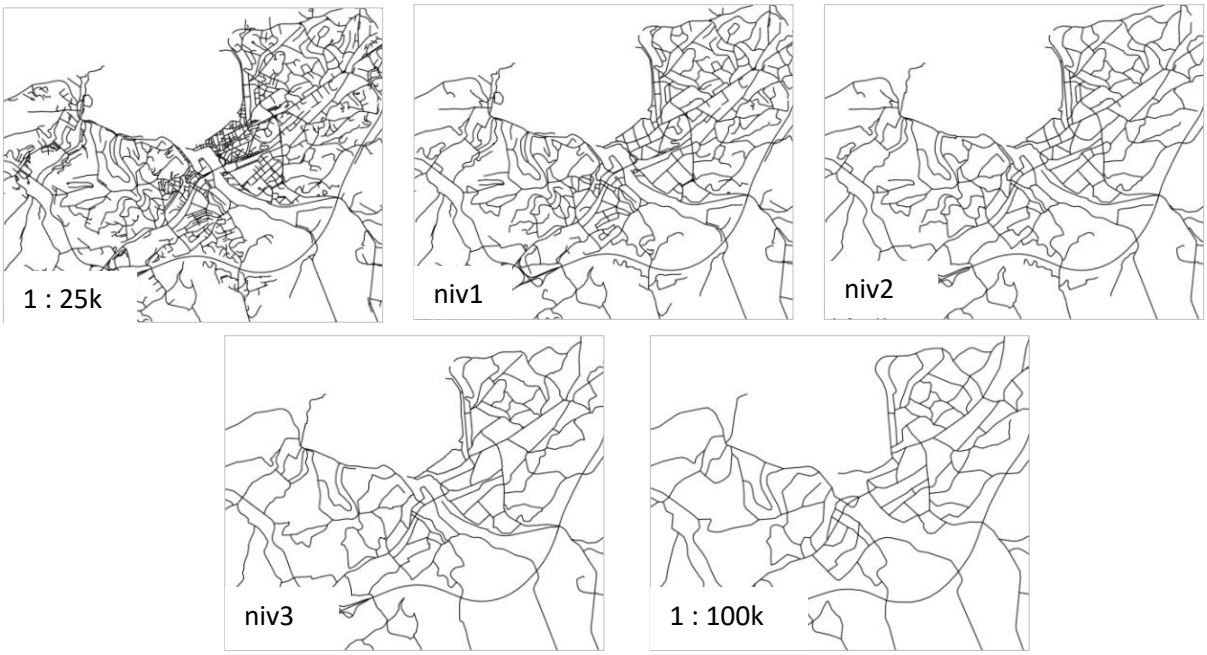


Figure 95. Résultats de notre processus de généralisation du routier en zone urbaine.

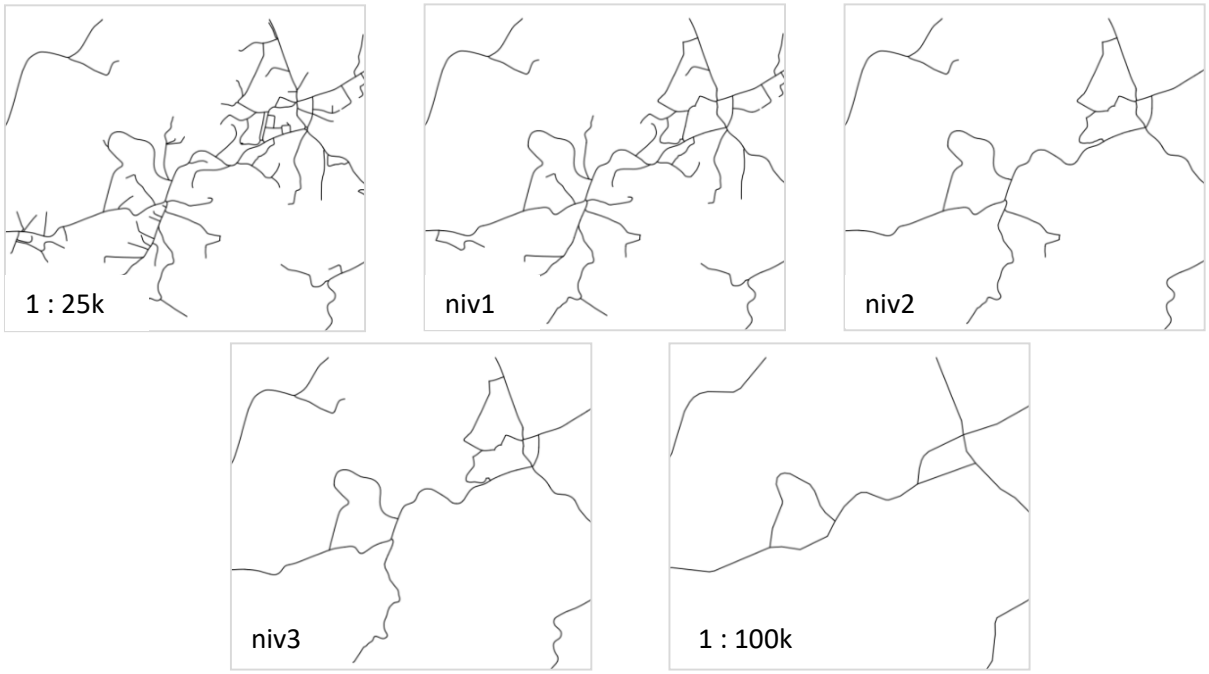


Figure 96. Résultats de notre processus de généralisation du routier en zone rurale.

Nous avons présenté dans cette partie les méthodes de symbolisation et les processus de généralisation utilisés pour créer **trois représentations intermédiaires pour chacun des thèmes géographiques impliqué dans notre matériel de test, à l'exception du bâti**. Ces trois représentations seront reprises dans chacune des pyramides que nous utiliserons pour notre expérience. Nous présentons maintenant les différents processus de généralisation que nous avons utilisés pour créer quatre transitions alternatives entre la représentation du bâti individuel et l'aire urbaine.

D.4. Production de Transitions Alternatives pour le Thème du Bâti

Dans le Chapitre C, nous avons formulé des hypothèses relatives à l'amélioration de la fluidité de navigation dans les cartes multi-échelles. Rappelons que pour vérifier ces hypothèses, nous allons réaliser un test utilisateurs en demandant à différents participants de réaliser une tâche cartographique sur différentes pyramides. Pour limiter les variables impliquées dans l'expérience, nous avons choisi de ne faire varier entre ces pyramides que la représentation du thème du bâti. Le paragraphe §D.4.1 présente maintenant les **différentes pyramides que nous allons produire**, ainsi que leur intérêt vis-à-vis de la vérification de nos hypothèses. Nous comparerons ainsi les résultats obtenus entre les différentes pyramides que nous allons produire, mais aussi entre ces pyramides et notre pyramide initiale, qui elle ne compte qu'une seule représentation intermédiaire (carte existante au 1 : 50k). Puis les paragraphes §D.4.2, §D.4.3, §D.4.4 et §D.4.5 présentent respectivement les **processus de généralisation utilisés pour produire chacune de ces transitions alternatives pour le thème du bâti**.

D.4.1. Différentes Pyramides Produites et Intérêt pour Nos Hypothèses

Ce paragraphe présente les différentes pyramides que nous allons créer pour l'expérience, c'est-à-dire les modalités que nous utiliserons pour évaluer nos hypothèses C1, C2 et C3. Nous proposons ici des **transitions alternatives** entre les représentations du bâti existantes au 1 : 25k et au 1 : 100k, c'est-à-dire **entre les niveaux d'abstraction du bâti individuel et de l'aire urbaine**.

Notre hypothèse C1 concerne l'influence de **l'utilisation de représentations mixtes** sur la fluidité de navigation. Rappelons si nécessaire que nous définissons une représentation mixte comme une représentation cartographique utilisant deux niveaux d'abstraction pour représenter un même phénomène géographique. Dans l'étude des pyramides existantes (§B.4.3), nous avons identifié deux transitions de représentation intéressantes qui utilisent des représentations mixtes : la transition par agrégation progressive et la transition par superposition. D'une part, la **transition par agrégation progressive** propose d'agréger progressivement les groupes de bâtiments individuels en ilots urbains, en fonction de leur densité, jusqu'à atteindre une emprise équivalente à celle de l'aire urbaine. Cette transition évolue donc sur plusieurs représentations intermédiaires successives et permet de créer une continuité visuelle avec la représentation de l'aire urbaine. D'autre part, la **transition par superposition** propose de créer une étape intermédiaire entre le bâti individuel et l'aire urbaine, en représentant ces deux niveaux d'abstraction à même échelle, en superposition. Cependant, même si cette représentation mixte est utilisée dans plusieurs représentations intermédiaires successives, elle ne permet pas en elle-même de créer plusieurs étapes progressives de simplification du contenu. Devant choisir l'une des deux stratégies pour limiter les pyramides à produire et à tester dans notre expérience, il nous semble donc plus pertinent de **choisir une transition par agrégation progressive**.

Par ailleurs, pour évaluer cette hypothèse il nous faudra **comparer cette pyramide à une pyramide sans représentation mixte**. Ne pas utiliser de représentation mixte signifie que chaque représentation intermédiaire n'utilise qu'un seul niveau d'abstraction. Si l'on se place dans notre cas d'étude, ce niveau d'abstraction pourra donc être du bâti individuel ou de l'aire urbaine. Le seul choix de construction ici est donc la représentation intermédiaire dans laquelle le changement de niveau d'abstraction intervient, lui-même contraint par la lisibilité du bâti individuel. En fonction de ce choix, cette pyramide pourrait donc être très proche de notre pyramide initiale, qui représente les

aires urbaines dès la carte existante au 1 : 50k. Il nous semble donc plus pertinent ici de ne pas produire une telle pyramide, préférant consacrer nos efforts à la production de transitions de représentations innovantes. Nous comparerons donc les performances obtenues entre la pyramide produite par agrégation progressive et la pyramide initiale, illustrées par la Figure 97.

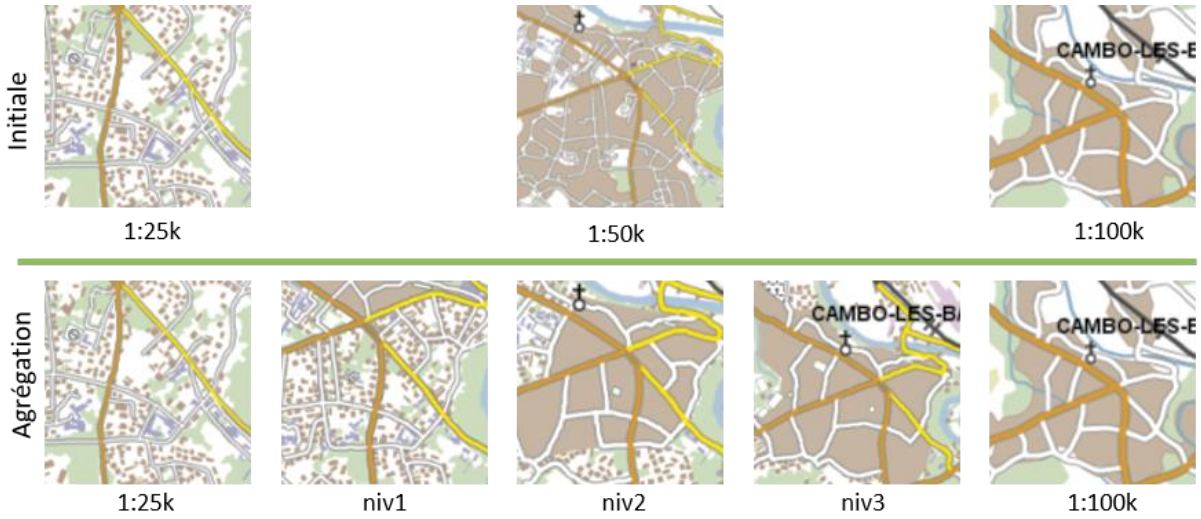


Figure 97. Comparaison visuelle des stratégies d'évolution du bâti entre la pyramide initiale (en haut) et la pyramide produite par agrégation progressive (en bas).

Nous espérons que cette comparaison nous permettra de trouver des éléments de réponse sur l'amélioration potentielle apportée par les représentations mixtes. Cependant, nous ne pourrons pas conclure sur notre hypothèse C1, le nombre de représentations intermédiaires étant variable entre ces deux pyramides.

L'hypothèse C2 concerne l'influence de la **progressivité de simplification du bâti, c'est-à-dire la relation entre le degré de généralisation et l'échelle d'affichage,** sur la fluidité de navigation. Ici nous comparons donc deux pyramides obtenues par un même processus de généralisation, mais avec une force de généralisation différente. Pour évaluer notre hypothèse C2, nous proposons donc de produire une première pyramide par un **processus de typification**, qui remplace un groupe d'objets bâti par un groupe ayant les mêmes caractéristiques mais comprenant moins d'objets. Ce processus permet donc de conserver un niveau d'abstraction détaillé à plus petite échelle, mais son utilisation est limitée, lorsque les objets restants ne sont plus assez nombreux pour respecter les caractéristiques initiales ou lorsqu'il y a trop de conflits spatiaux à résoudre, en zone urbaine dense notamment. Dans ce cas, nous proposons d'agréger les éléments bâtis traités par un ilot bâti. A l'opposé, nous proposons de produire une seconde pyramide par **agrégation progressive**, en agrégeant rapidement les ilots urbains denses, jusqu'à atteindre l'emprise spatiale de l'aire urbaine de la carte au 1 : 100k. Ici, les bâtiments en zone moins dense sont donc susceptibles d'être encore représentés à moyenne échelle et il sera parfois nécessaire de les simplifier pour assurer leur lisibilité. Nous proposons donc de les typifier, en réutilisant les résultats de la pyramide précédente.

Pour évaluer l'hypothèse C2 nous comparerons donc deux pyramides, **toutes deux utilisant un processus de typification du bâti individuel et une agrégation progressive en ilots urbains, mais avec une rapidité d'agrégation différente**, comme illustrées en Figure 98. Ces processus de généralisation seront respectivement présentés dans les paragraphes §D.4.2 et §D.4.4.

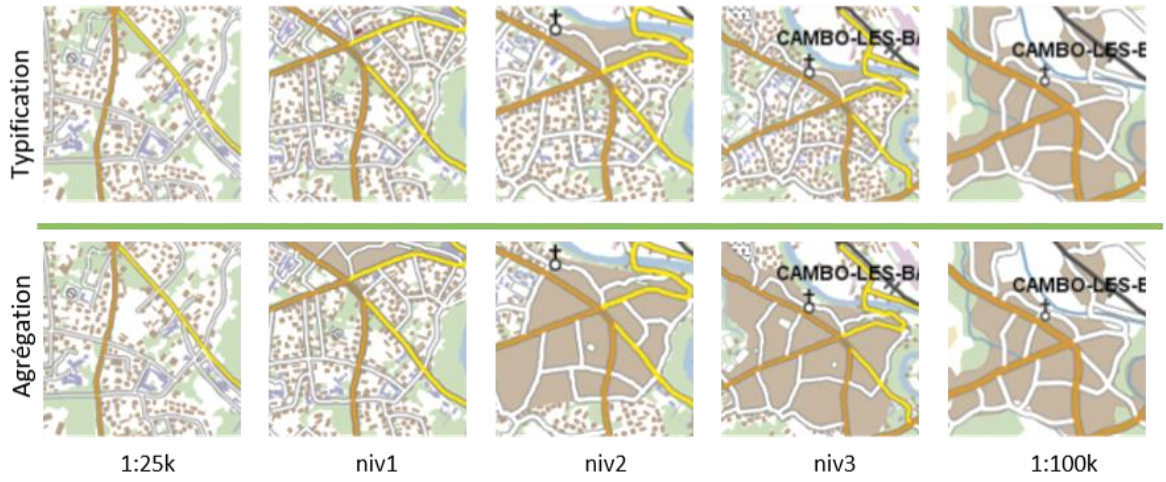


Figure 98. Comparaison entre la pyramide produite par typification et la pyramide obtenue par agrégation progressive, les deux utilisant un même processus de généralisation, mais avec une force d'agrégation différente.

Enfin, l'hypothèse C3 concerne l'influence de **l'utilisation d'une représentation fidèle des repères visuels** sur la fluidité de navigation. D'une part, nous proposons ici de créer une version spéciale de la pyramide construite par agrégation progressive, en **représentant les bâtiments saillants au-dessus des ilots urbains**, comme illustré par la Figure 99. Pour produire cette pyramide, il nous faudra sélectionner ces bâtiments saillants, mais aussi faire des choix de représentation pour assurer la lisibilité du rendu. L'ensemble de ces choix seront présentés dans le paragraphe §D.4.5.

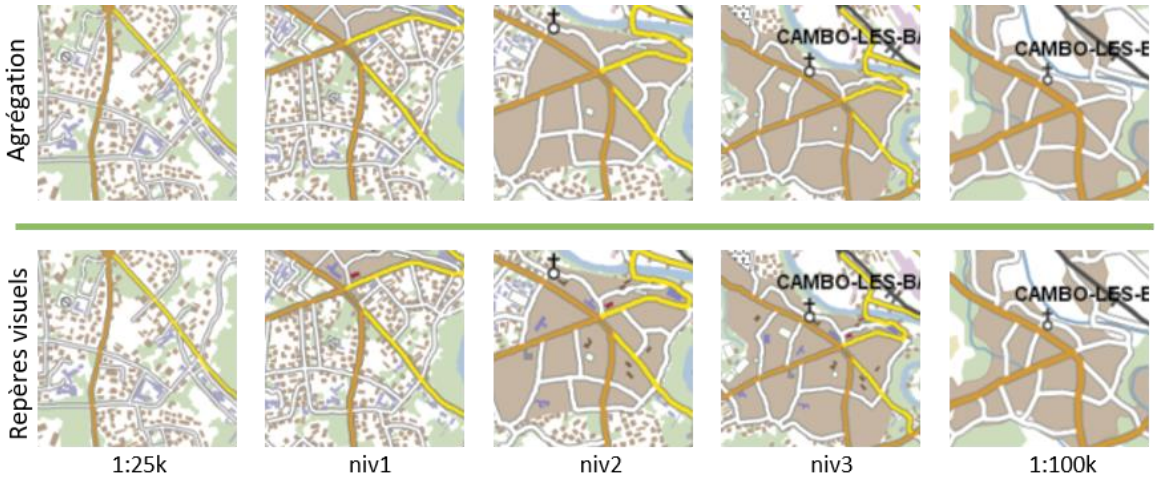


Figure 99. Comparaison entre la pyramide construite par agrégation progressive, et sa variante préservant les bâtiments saillants au-dessus des ilots urbains.

D'autre part, toujours pour évaluer cette hypothèse C3, nous proposons ici **d'exploiter la pyramide obtenue par typification**. Ce processus conserve théoriquement les motifs spatiaux, comme les alignements des objets bâtis ou la présence d'espaces vides, qui peuvent aussi servir de repères visuels à l'utilisateur. Pour évaluer l'influence de cette préservation des motifs spatiaux, nous comparerons les résultats obtenus pour cette pyramide à ceux obtenus avec une pyramide ne les prenant pas spécifiquement en compte dans la simplification du bâti. Nous proposons ici de produire cette pyramide par un processus de généralisation basé sur les modèles **AGENT** [Barrault et al., 2001]

et CartACom [Duchêne 2004], dont l'optimisation a déjà été démontrée pour la production cartographique à échelle discrète. La Figure 100 montre que le rendu de ces deux pyramides est finalement assez proche, nous pourrons donc les comparer aisément et évaluer leur potentiel pour la production de cartes multi-échelles.

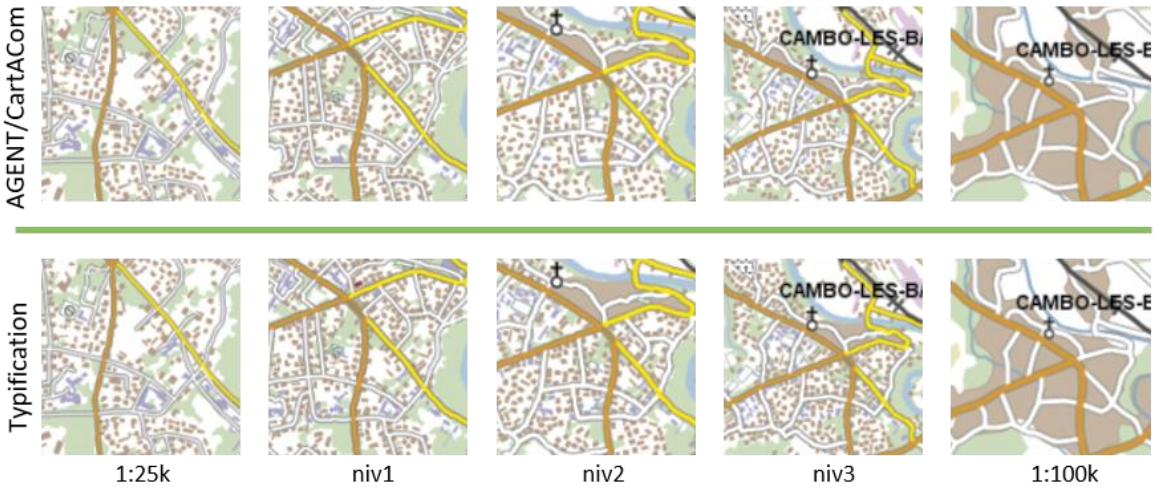


Figure 100. Comparaison entre les pyramides obtenues par un processus de généralisation basé sur les modèles AGENT et CartACom et par un processus de typification.

Finalement, nous inclurons donc quatre pyramides différentes à notre expérience, en plus de la **pyramide initiale** extraite de Scan Express :

- une pyramide produite par un processus de **typification** ;
- une pyramide produite par un processus basé sur les modèles **AGENT/CartACom** ;
- une pyramide utilisant une transition par **agrégation progressive** ;
- une pyramide préservant des **repères visuels**, basée sur la pyramide créée par agrégation progressive

Les paragraphes suivants présentent respectivement les processus de généralisation que nous avons utilisés pour produire ces quatre alternatives pour la transition de représentation du bâti entre les cartes existantes au 1 : 25k et au 1 : 100k.

D.4.2. Transition Construite par Typification

Comme nous l'avons déjà mentionné, les **opérateurs de typification** présentent selon nous de nombreux intérêts pour la généralisation multi-échelle. Le principe de cet opérateur est de diminuer la quantité d'objets, tout en conservant une représentation détaillée et en préservant les caractéristiques principales de l'information initiale, comme illustré par les cartes de la pyramide Swisstopo en Figure 101.

Figure 101. Utilisation d'un processus de typification à plusieurs échelles consécutives dans la pyramide cartographique de Swisstopo.

Selon les algorithmes utilisés, la typification permet ainsi de **préserver la répartition et la densité d'information, mais aussi les structures régulières**, comme les alignements. Le principal avantage de cet opérateur est donc de pouvoir **jouer sur la relation entre niveau d'abstraction et échelle d'affichage** puisqu'en diminuant la quantité d'objets, on peut utiliser un niveau d'abstraction plus détaillé à plus petite échelle. En revanche, le principe même de la typification peut être source de désorientation de l'utilisateur, puisqu'il consiste à remplacer un groupe d'objets bâtis initiaux par d'autres objets, fictifs cette fois. Ainsi le producteur ICGC Catalogne remplace les objets bâtis par des carrés noirs uniformes, comme illustré en Figure 102.

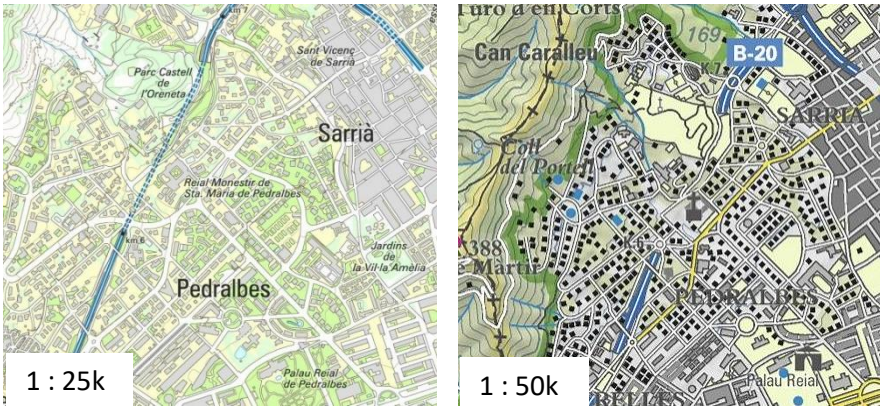


Figure 102. Utilisation d'un processus de typification entre deux échelles consécutives dans la pyramide cartographique de l'ICGC Catalogne, en remplaçant les objets existants par des carrés noirs non discriminés.

En particulier, si les bâtiments qui servent de repères visuels à l'utilisateur sont ainsi modifiés, celui-ci peut avoir plus de difficultés à effectuer une tâche cartographique. Pour éviter cet écueil, nous souhaitons configurer des **objets devant rester fidèles sinon invariants** dans le processus de typification, comme l'illustrent les résultats de l'ACT Luxembourg dans la Figure 103. Pour permettre une navigation multi-échelle aisée, nous pensons donc qu'un **processus de typification doit à la fois préserver les caractéristiques aussi bien des structures régulières qu'irrégulières, préserver les différences de densité urbaine et enfin préserver une représentation fidèle sinon invariante des repères visuels potentiels.**

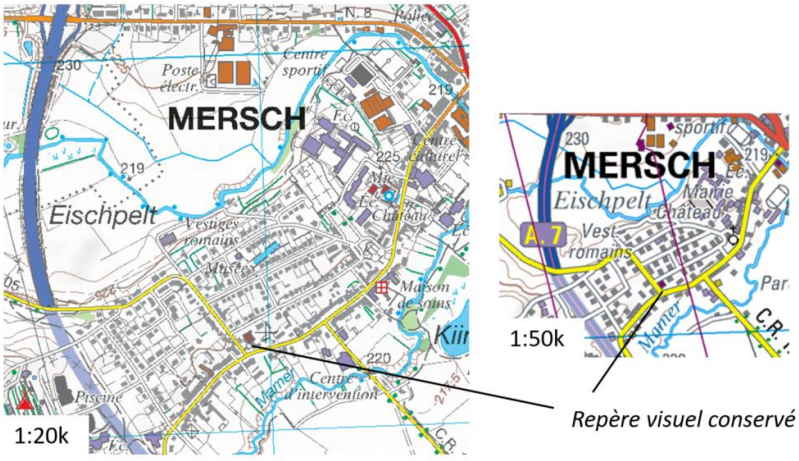


Figure 103. Conservation d'une représentation fidèle pour des repères visuels par le processus de typification de l'ACT Luxembourg.

Pour identifier celui qui correspondait le mieux à nos attentes, nous avons effectué une revue des algorithmes de typification existants les plus aboutis, incluant les travaux de [Regnauld 2001 ; Sester 2005 ; Burghardt et Cecconi, 2007 ; Bildirici et al., 2011 ; Savino et al., 2011]. Des pratiques communes ressortent de cette littérature. La plupart des algorithmes calculent le **critère d'arrêt du processus comme nombre d'objets restants** en fonction de l'échelle de symbolisation cible, à partir de la loi de Töpfer [Töpfer et Pillewizer, 1966]. Certains travaux proposent des variantes de cette loi, en utilisant une formule différente en fonction de l'échelle [Bildirici et al., 2011] ou en prenant en compte les valeurs de représentations existantes [Burghardt et Cecconi, 2007]. Excepté les travaux de [Sester 2005] qui proposent une sélection aléatoire des objets à éliminer, partant du principe que tous les objets sont d'importance égale, les autres méthodes proposent de **construire un graphe, à partir des centroïdes des objets considérés**, pour contraindre la préservation des structures existantes. Plusieurs méthodes proposent aussi de préserver les objets en bord ou en angle du groupe auxquels ils appartiennent [Regnauld 2001 ; Bildirici et al., 2011], considérant que ces positions en font des points de repères potentiels. Les travaux de [Burghardt et Cecconi, 2007] proposent quant à eux de prendre en considération les variables visuelles d'un objet, relativement à celle de son voisinage, pour conserver les objets les plus saillants comme **invariants**. Concernant la préservation de la **densité locale**, seul l'algorithme proposé par [Burghardt et Cecconi, 2007] propose d'en tenir compte pour ne pas simplifier à l'excès les groupes les plus denses et gommer les différences de densité initiale. Les autres travaux gèrent les objets par petits groupes en considérant que la densité y est homogène. Enfin, ces processus appliquent principalement la même méthode pour diminuer la quantité d'objets en **substituant à un groupe d'objets un objet unique**, excepté les travaux de [Savino et al., 2011] qui peuplent l'emprise du groupe initial par un nouveau groupe d'objets, moins nombreux mais ayant les mêmes caractéristiques de répartition spatiale notamment. Néanmoins, ces travaux étudient la typification de canaux d'irrigation et sont donc principalement adaptés à des objets linéaires. Les **caractéristiques de ce(s) substitut(s) sont alors calculées en fonction du groupe d'objets qu'il(s) remplace(nt)**. Par exemple dans le cas d'un groupe de bâtis, le substitut pourra se positionner au centroïde du groupe, en prenant la taille moyenne des objets remplacés [Sester 2005 ; Burghardt et Cecconi, 2007].

En nous basant sur cette étude, nous choisissons l'algorithme de [Burghardt et Cecconi, 2007] pour produire notre pyramide par typification, qui semble le meilleur choix selon nos critères et sa complexité d'implémentation. Cet algorithme considère une triangulation de Delaunay, construite à partir des centroïdes des objets bâtis initiaux. Pour la cohérence et la préservation de la répartition spatiale initiale, nous avons personnellement choisi de **contraindre cette triangulation en fonction du réseau routier généralisé** en supprimant les arcs qui intersectent une route ou une impasse (Figure 104). Les arcs restants relient donc forcément deux bâtis faisant partie du même ilot.

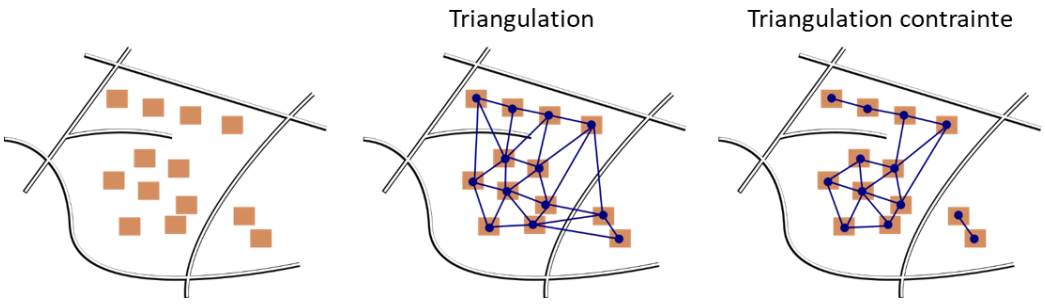


Figure 104. Explication du principe de notre triangulation contrainte en fonction du réseau routier.

Cet algorithme traite ensuite un à un ces arcs, en commençant par l'arc de valeur minimale. Cette valeur est initialement égale à la distance géographique (bord à bord) entre les bâtiments que relie l'arc. Les bâtiments les plus proches seront donc typifiés plus rapidement. Cet aspect en particulier peut poser problème en zone urbaine dense, où les distances entre bâtiments voisins sont moins importantes. Si l'on ne prend pas en compte la densité locale ici, les zones urbaines vont être plus fortement simplifiées et la différence de densité ne sera pas préservée dans la carte. Nous suivons donc ici le conseil des auteurs de **pondérer la valeur des arcs en fonction de la densité locale**, pour que les zones de forte densité soient moins sujettes aux simplifications drastiques.

Les travaux de [Burghardt et Cecconi, 2007] proposent également de pondérer la valeur des arcs en fonction de leur saillance, **pour conserver les bâtiments les plus saillants comme invariants**. Pour cela, il faut calculer la saillance de chaque bâtiment, en fonction de ses caractéristiques visuelles, au regard de son voisinage mais aussi de l'ensemble du bâti sur notre zone d'étude. Par manque de temps, nous n'avons pas appliqué directement cette méthode, mais avons plutôt choisi **d'imposer des conditions au traitement d'un arc.** Ainsi, lorsqu'un arc est traité, on ne réalisera pas l'opération de typification si l'un des deux bâtiments qu'il relie est particulièrement grand (selon un seuil de taille fixe). On ne réalisera pas non plus l'opération de typification si les deux bâtiments considérés n'ont pas le même attribut *nature*, qui décrit sa fonction (bâtiment commercial, mairie, etc.) et détermine sa couleur dans la légende Scan Express.

Lorsqu'un arc est traité et que ces conditions sont remplies, les deux objets bâtis qu'il relie sont éliminés et remplacés par un nouvel objet bâti, que l'on nommera *substitut*. **Ses caractéristiques géométriques sont quant à elles définies en fonction des objets qu'il remplace.** Dans le cas où un substitut remplace deux bâtis initiaux, seuls ces objets sont pris en compte. En revanche, si plusieurs opérations de typification ont déjà été réalisées dans cet ilot, les objets que relie l'arc traité peuvent eux-mêmes être des substituts. Dans ce cas, **tous les objets initiaux que remplace le nouveau substitut sont pris en compte dans la définition de sa géométrie**. Ainsi dans la Figure 105, après plusieurs étapes de typification successives, le substitut (point vert) sur la dernière image est construit à partir des trois objets initiaux (emprises rouges) qu'il remplace.

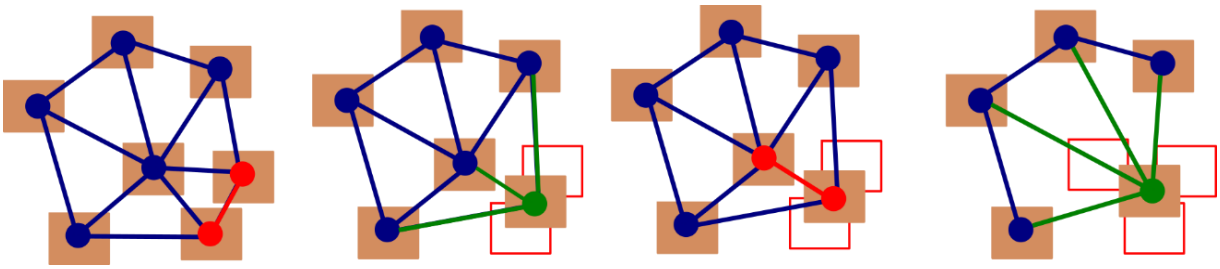


Figure 105. Illustration du principe de substitution, de gauche à droite : le plus petit arc (en rouge) est traité et un substitut (en vert) remplace les deux objets qu'il reliait, et les arcs avec ses voisins sont modifiés (en vert).

Un substitut remplace les points correspondants aux objets typifiés dans la triangulation : un point (vert) remplace les deux points précédents (rouges). Les liens entre les points supprimés et leurs voisins sont modifiés en conséquence pour se connecter au substitut (en vert). Un nouvel objet bâti est également ajouté dans la carte, en remplacement des objets précédents. La position du substitut est alors définie comme le centroïde du groupe remplacé. Sa taille est égale à la taille moyenne du groupe d'objets remplacés. Sa forme (ratio longueur/largeur) et son orientation sont héritées de

celles du plus grand objet du groupe remplacé. Enfin, son attribut *nature* est hérité de celui des bâtiments du groupe remplacé et définit sa symbolisation.

Comme proposé par les auteurs, nous utilisons un nombre d'objets restants comme critère d'arrêt. Ce nombre cible est calculé avec **la loi de Töpfer en fonction de l'échelle de symbolisation visée**. Dans un contexte multi-échelle comme le nôtre, les auteurs proposent de contraindre cette formule en fonction de la quantité d'objets restants dans une représentation existante moins détaillée. Cependant dans notre cas, la carte existante au 1 : 100k ne représentant que les aires urbaines, nous ne disposons pas de cette information. Les résultats avec ce critère d'arrêt sont plutôt bons en termes de quantité d'information. En revanche, les bâtiments restants sont souvent trop proches pour être correctement distingués, en particulier en zone urbaine dense. Ajouter une contrainte de distance minimale dans le critère d'arrêt ne s'est pas révélé concluant ici : l'algorithme de typification n'ayant pas la possibilité de déplacer les objets sans en éliminer, la quantité d'information est drastiquement simplifiée. Nous choisissons donc de n'utiliser que le nombre d'objets comme critère d'arrêt et **d'appliquer un post-traitement pour déplacer les objets qui le nécessitent**.

Ce processus de déplacement a aussi été utilisé pour **nettoyer les données initiales**, c'est-à-dire les bâtiments issus du processus quasi-automatique de Scan Express en conflit spatial dans la carte existante au 1 : 25k. Nous traitons donc à la fois les conflits entre bâtiments trop proches pour être discernables, mais également les conflits entre bâtiment et route, qui ne peuvent apparaitre dans le résultat de la typification, la triangulation amenant systématiquement les bâtiments vers le centre de l'ilot. Nous utilisons ici trois opérations différentes pour supprimer la majorité des conflits, comme illustré par la Figure 106.

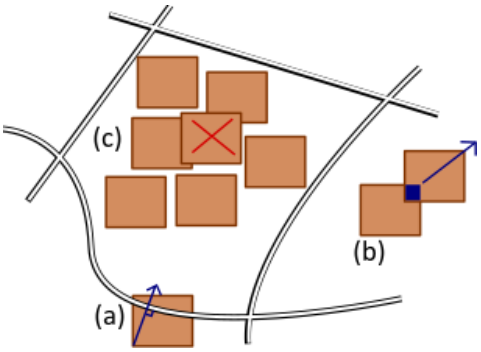


Figure 106. Illustration des trois méthodes utilisées pour corriger les conflits spatiaux entre bâtiments et entre bâtiment et route.

Dans le cas où un bâtiment et une route sont en intersection (a), nous appliquons l'idée de [Sester 2007] de **pousser les bâtis à l'intérieur de l'ilot**. Pour cela, nous identifions le sommet de l'objet bâti le plus loin de l'ilot, au cas où plusieurs sommets seraient en dehors. Puis nous calculons le projeté de ce point sur la route et utilisons le vecteur défini par ces deux points pour le déplacement, avec une petite marge supplémentaire pour éloigner le bâtiment de la route. Cet algorithme pourrait être amélioré en utilisant une méthode essais-erreurs pour le choix des bâtiments à déplacer, plutôt que des itérations successives sans annulation. C'est le cas de l'opération que nous utilisons pour résoudre les conflits entre bâtiments (b), basé sur une méthode de descente de gradient stochastique[1]. Le principe est de choisir un bâtiment au hasard puis de lui

[1] Algorithme disponible ici : https://github.com/IGNF/CartAGen/blob/master/cartagen-core/src/main/java/fr/ign/cogit/cartagen/algorithms/block/displacement/BuildingDisplacementRandom.java

faire subir un déplacement aléatoire, uniquement validé s'il a permis de diminuer le conflit. Pour résoudre les derniers conflits en zone très contrainte (c), nous adoptons une méthode de **suppression des bâtis les plus chevauchants** [Taillandier 2008, pp. 381-382] qui calcule la part de chaque objet en intersection et supprime les plus en conflits. Les résultats de ce processus sur nos données initiales au 1 : 25k sont présentés dans la Figure 107.

Avant résolution *Après résolution*

Figure 107. Illustration des résultats du processus de résolution de conflits spatiaux sur un extrait des données initiales au 1 : 25k.

Cet algorithme de résolution de conflits a résolu une majeure partie des problèmes existants sur notre zone d'étude et très peu de reprises manuelles ont été nécessaires. En ce qui concerne les résultats du processus de typification en général, nous avons effectué une reprise manuelle pour vérifier la préservation des structures saillantes, comme les alignements de bâtiments. Contrairement aux résultats présentés dans [Burghardt et Cecconi, 2007], **ces structures ont finalement été relativement bien conservées par notre version de l'algorithme**. Ces améliorations peuvent sans doute être imputées à la contrainte de la triangulation par le réseau routier, ou bien plus simplement à l'étude d'une plus petite plage d'échelle que celle de [Burghardt et Cecconi, 2007].

Les Figure 108 et Figure 109 présentent les résultats de notre algorithme de typification, avec résolutions des conflits et corrections manuelles, sur un extrait de notre zone d'étude, respectivement en espace rural et urbain. Pour aider à la comparaison des résultats, ces extraits sont ici présentés à même échelle.

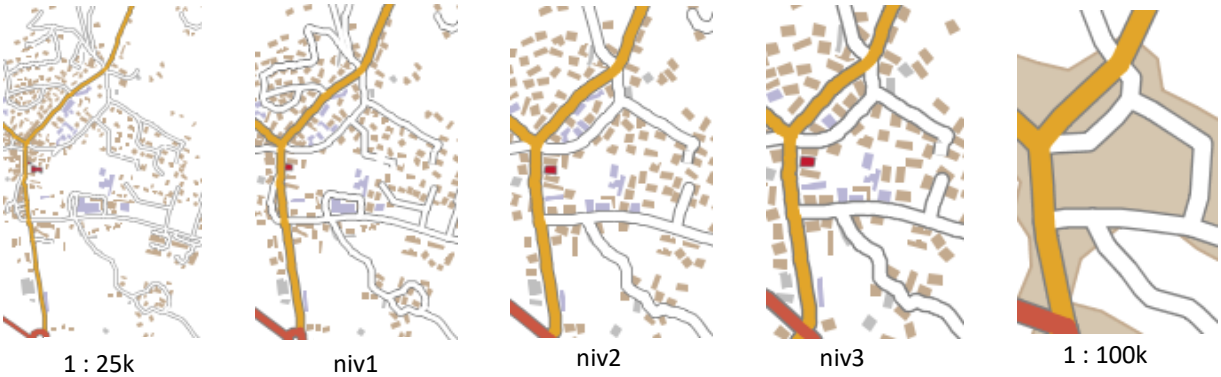


Figure 108. Résultats de notre processus de typification au fil des représentations, en espace rural.

En espace urbain où les structures régulières sont plus fréquentes, on observe que le processus de typification préserve relativement bien les alignements de bâtiments et la répartition des espaces vides. Néanmoins, bien qu'elle prenne la densité locale en considération, la typification a tendance à **effacer les différences de densités** entre les différents ilots urbains. Par ailleurs, pour les ilots urbains en centre-ville, particulièrement petits et denses, le processus de typification est rapidement limité par la faible quantité d'objets bâtis. Pour préserver les caractéristiques des données initiales, nous avons choisi d'agréger les bâtis en ilots urbains lorsque la différence de densité initiale était trop réduite par le processus de typification. Par abus de langage, nous appellerons aussi cette opération le ***grisage des ilots***, cette couleur étant la représentation traditionnelle des ilots urbains dans les cartes de l'IGN. La Figure 110 présente ainsi nos résultats en espace urbain, sur la même zone que la Figure 109, avec grisage des ilots. La différence de densité entre les ilots urbains du centre-ville et ceux plus en périphérie est alors explicite grâce à la présence des ilots. Un extrait de la pyramide construite par ce processus de typification est présenté en Annexe G.2.

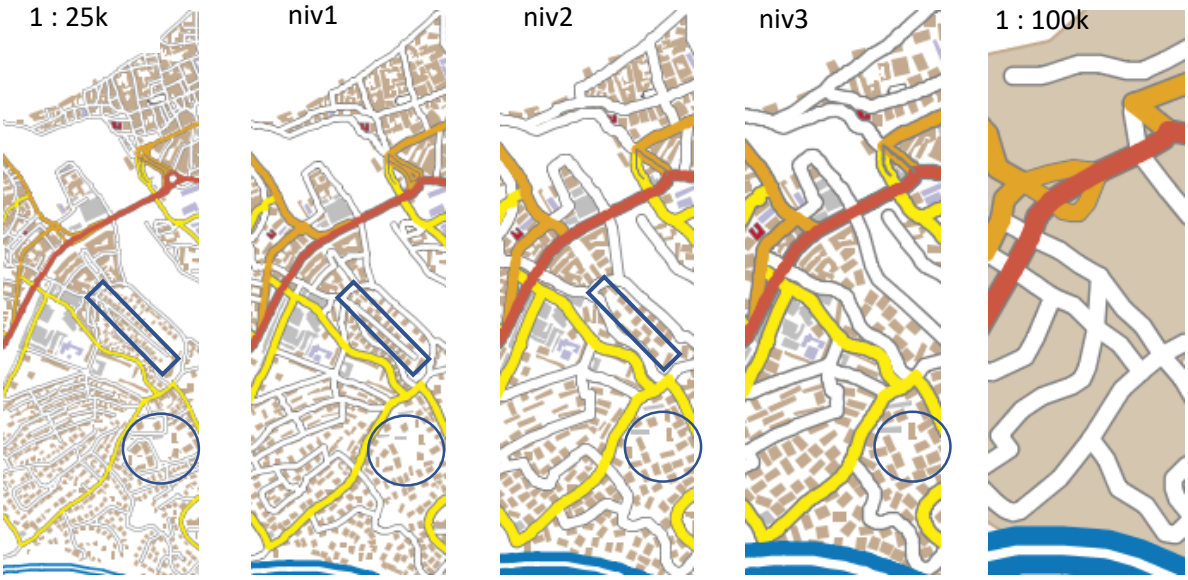


Figure 109. Résultats de notre processus de typification au fil des représentations, en espace urbain.

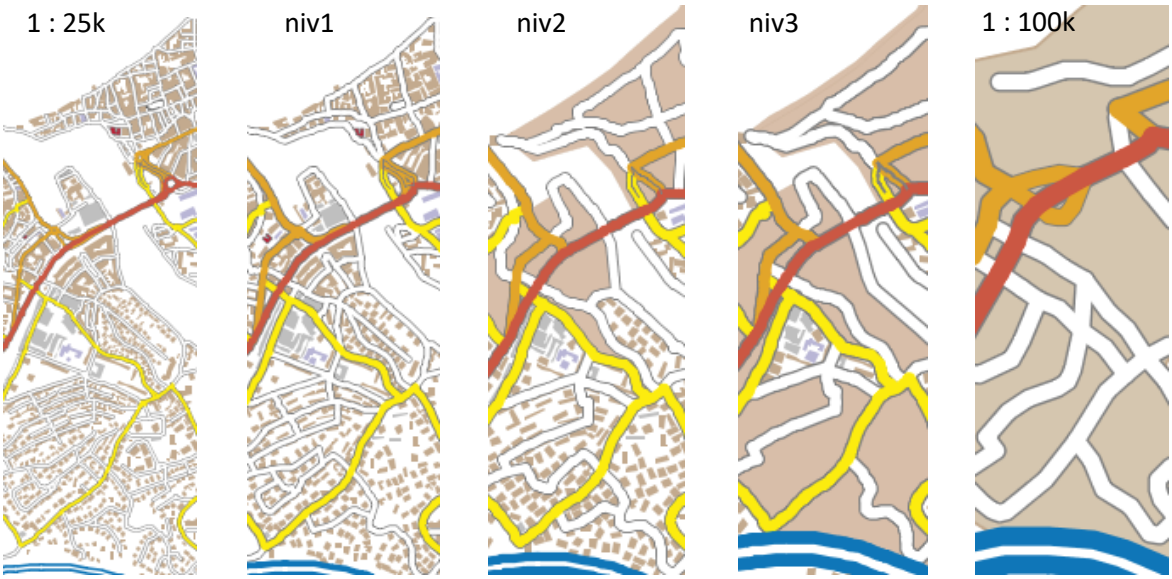


Figure 110. Résultats de notre processus de typification avec grisage des ilots urbains.

D.4.3. Transition Construite par les Processus AGENT/CartACom

Pour évaluer notre hypothèse concernant **l'influence de la préservation des structures spatiales** sur la fluidité de navigation, nous comparerons les performances obtenues avec la pyramide construite par typification à une autre pyramide, construite avec les modèles AGENT [Ruas 1999 ; Barrault et al., 2001] et CartACom [Duchêne 2004 ; Duchêne et al., 2012], qui ne les conservent pas spécifiquement. Le potentiel de tels processus pour la généralisation à échelle discrète a déjà été démontré dans notre gamme d'échelles. En produisant cette pyramide, nous souhaitons maintenant **évaluer le potentiel de ces modèles pour la production de carte multi-échelle** et comparer ses résultats à nos autres méthodes de généralisation du bâti.

Ces deux modèles sont basés sur des **systèmes multi-agents**, dans le but de proposer un processus de généralisation automatique, s'adaptant localement aux différentes situations cartographiques. Pour cela, il est nécessaire de décrire explicitement les situations locales, en enrichissant les données, et de fournir des règles à appliquer pour chaque situation. Dans le modèle AGENT [Ruas 1999 ; Barrault et al., 2001], chaque objet cartographique est ainsi modélisé comme un agent, ayant pour but d'améliorer sa situation, selon **les contraintes cartographiques** dont il fait l'objet. Comme pour des processus de généralisation classiques, ces contraintes peuvent porter sur les seuils de lisibilité ou de préservation de l'information initiale et avoir des priorités et une flexibilité différente. Un agent vise donc une valeur cible pour chacune de ses contraintes et va devoir réaliser des actions pour s'en approcher, c'est-à-dire s'appliquer à lui-même des **opérations de généralisation** comme une simplification, un déplacement ou une élimination. L'agent évalue puis choisit les opérations à appliquer en fonction de sa situation et de ses contraintes. Chaque agent ne connait alors que ses propres contraintes. Pour satisfaire des contraintes globales, le modèle AGENT repose sur une **hiérarchie de ses agents** :

- des objets individuels dits de niveau *micro* qui gèrent des contraintes internes, sur leur géométrie notamment ;
- des agents dits *meso* qui gèrent les contraintes de groupes.

Le modèle AGENT est donc particulièrement optimisé pour traiter des **espaces urbains**, où il est aisé de modéliser cette structure hiérarchique. On modélisera les objets bâtis comme des agents *micro,* avec des contraintes sur leur taille, granularité, équarrité, convexité et élongation ; et les ilots urbains comme des agents *meso*, avec des contraintes sur leur densité, la proximité entre les bâtiments ou la préservation des grands bâtiments.

Le processus CartACom [Duchêne 2004 ; Duchêne et al., 2012] propose quant à lui une extension du modèle AGENT, où les agents sont toujours de niveau *micro* mais seraient **capables de communiquer**. Chaque agent a ainsi connaissance de son environnement et de la présence de ses voisins. Il est donc possible de gérer les **contraintes relationnelles** entre agents *micro*, sans passer par des agents *meso*. Ce modèle est donc plus facilement applicable à des **espaces ruraux** que le modèle AGENT, où il est difficile de modéliser une structure hiérarchique en agents *meso* disjoints. En pratique, ces deux processus sont **déjà implémentés dans GeOxygene**, notamment via le module CollaGen [Touya 2011].

Nous avons donc **appliqué le processus AGENT sur nos espaces urbains et le processus CartACom sur nos espaces ruraux**. Ici, nous avons utilisé la même partition urbain/rural que pour la généralisation du routier, basée sur la méthode de [Boffet 2001]. L'espace que nous considérerons

comme rural (c'est-à-dire tout ce qui n'est pas urbain) est parfois plus dense que les espaces sur lesquels CartACom a été éprouvé. Par ailleurs, **seuls les objets du thème bâti sont modélisés comme des agents** dans notre implémentation, ce qui limite les possibilités de généralisation. Cela nous permet néanmoins d'avoir les autres thèmes invariants entre les différentes pyramides, ce que nous souhaitons pour notre expérience. Finalement, nous obtenons des résultats que nous jugeons plutôt corrects avec ces processus mais avons dû parfois appliqué un post-traitement, notamment pour la dernière représentation intermédiaire (niv3). Ici nous avons utilisé l'algorithme de déplacement par descente de gradient puis l'algorithme de suppression des bâtis les plus chevauchants, déjà mentionnés dans la partie précédente. Un extrait de cette pyramide, respectivement en espace rural et urbain, est présenté dans les Figure 111 et Figure 112.

Figure 111. Extrait de la pyramide construite par AGENT/CartACom pour nos cinq représentations, sur un espace rural.

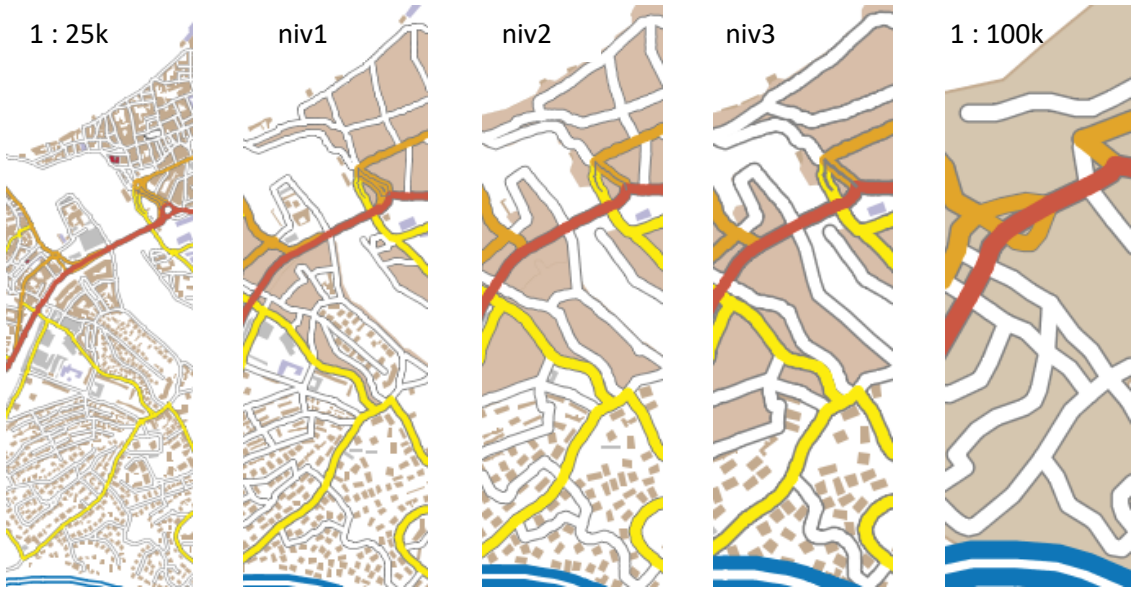


Figure 112. Extrait de la pyramide construite par AGENT/CartACom pour nos cinq représentations, sur un espace urbain.

Par ailleurs, lorsque les contraintes ne peuvent être satisfaites en conservant les bâtiments individuels, les agents ilots bâtis (meso) les agrègent et se grisent automatiquement. Si l'on compare ce résultat à notre pyramide obtenue par typification dans la Figure 113, on remarque que les ilots ne sont pas **grisés de la même manière au fil des échelles,** notamment en centre-ville. De manière générale, la typification semble mieux préserver les structures régulières, la répartition spatiale et la

distribution de la densité bâtie, notamment en zone urbaine. Néanmoins, la différence de contenu entre les deux pyramides peut être difficile à percevoir pour un utilisateur non expert. Nous prenons donc ici le risque que cette différence soit trop faible pour être sensible de nos utilisateurs.

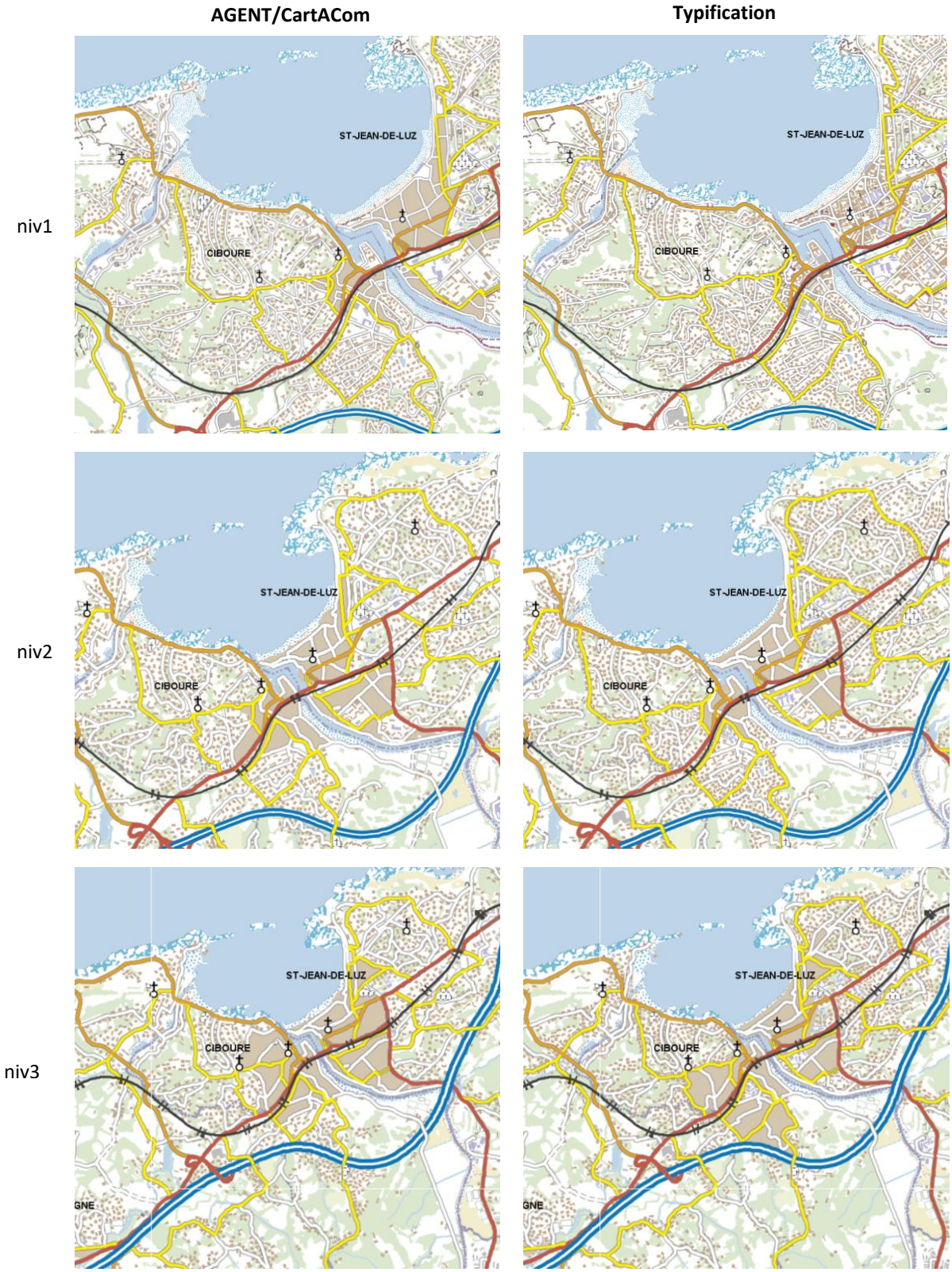


Figure 113. Comparaison de l'évolution du grisage des ilots au fil des représentations intermédiaires entre la pyramide obtenue par AGENT/CartACom et la pyramide construite par typification.

Enfin, malgré l'**évolution plus fluide du degré de généralisation au fil des échelles** proposée par ces deux pyramides, on observe toujours **une simplification drastique entre le niv3 et le 1 : 100k** lors du passage à l'aire urbaine. Bien que nos résultats semblent être de bonne qualité cartographique, nos choix de généralisation peuvent ici être remis en question, concernant la progressivité d'évolution du degré de généralisation en fonction de l'échelle d'affichage. Néanmoins, nous n'avons pour le moment pas de connaissances solides sur ce qui facilite le plus la navigation utilisateur : préserver plus fidèlement les caractéristiques de l'information initiale, en gardant plus longtemps une représentation détaillée et en préservant les espaces vides, ou bien au contraire **changer le niveau d'abstraction plus rapidement pour faciliter la transition visuelle** avec la carte existante au 1 : 100k. Nous allons donc maintenant produire une pyramide appliquant cette seconde stratégie. Un extrait de la pyramide construite par ces processus AGENT/CartACom est présenté en Annexe G.3.

D.4.4. Transition Construite par Agrégation Progressive

Dans l'étude des pyramides existantes, nous avions déjà identifié que les **sauts de niveaux d'abstraction** étaient un facteur majeur d'une potentielle désorientation de l'utilisateur. Nous pensons ici qu'utiliser des opérations d'agrégation permettrait de rendre cette transition de représentation plus progressive. En utilisant un niveau d'abstraction plus proche de la représentation existante la moins détaillée (au 1 : 100k), nous espérons que la variation de complexité visuelle sera également plus régulière au fil des échelles. Dans notre cas d'étude, nous chercherons ainsi à **agréger progressivement les objets bâtis en ilots urbains, tels que découpés par le réseau routier généralisé**. Plusieurs producteurs cartographiques utilisent aujourd'hui cet opérateur pour créer une abstraction intermédiaire entre le bâti individuel et l'aire urbaine, comme le Kadaster (Pays-Bas) [Bruns et al., 2011], qui propose de couvrir ou *griser* les ilots urbains, ou l'OSGB (Grande-Bretagne) [Regnauld et Revell, 2007 ; Revell et al., 2011] qui propose d'agréger les groupes de bâtis pour ne couvrir que la surface bâtie de l'ilot. Souhaitant utiliser les géométries des ilots ici, pour créer une transition plus fluide vers l'aire urbaine, nous choisissons ici d'appliquer les méthodes de [Bruns et al., 2011].

Nous cherchons donc ici à générer une transition par agrégation progressive entre nos données initiales au 1 : 25k et les aires urbaines existantes au 1 : 100k, en suivant les contraintes suivantes : **plus les ilots urbains sont petits, denses et/ou proches du centre-ville, plus ils doivent être grisés rapidement.** Cette partie présente des résultats publiés dans [Touya et Dumont, 2017].

Précisons ici que ces aires urbaines ne correspondent pas forcément à ce que l'on considère comme l'espace urbain, mais plutôt à des **étendues contigües de zones bâties**. On pourra donc y rencontrer des ilots péri-urbains ou ruraux. Pour créer une agrégation progressive, nous proposons donc d'agréger les ilots en fonction du type d'espace géographique auquel ils appartiennent. Nous agrégerons ainsi plus rapidement les ilots en espace urbain, puis en espace péri-urbain, puis en espace rural. Pour construire ces espaces, nous pourrions utiliser la méthode de [Boffet 2001], à partir d'une dilatation des géométries des objets bâtis. Les travaux de [Touya 2011, pp. 219-221] proposent de construire les espaces péri-urbains en utilisant un rayon de dilatation plus important que pour l'urbain. Néanmoins, cette méthode repose avant tout sur la continuité des zones bâties, sans considérer les petites zones bâties isolées. Ses résultats ne reflètent donc pas les différences de densité ou de distribution spatiale entre les ilots. Ainsi en zone péri-urbaine, un ilot unique peut être plus dense que son voisinage et nous souhaitons qu'il soit grisé plus rapidement. **Nous cherchons donc ici une autre méthode pour définir l'espace géographique auquel appartient chaque ilot.**

Pour **construire les ilots** de chaque représentation intermédiaire, nous utilisons les espaces urbains obtenus par la méthode de [Boffet, 2001], que l'on découpe avec les réseaux routier, ferré et hydrographique généralisés. Puis, pour caractériser l'espace géographique auquel ils appartiennent, nous utilisons deux méthodes différentes. Dans un premier temps, nous appliquons un premier algorithme permettant de **détecter les ilots formant le centre-ville**. Sur notre zone d'étude, ces ilots sont caractérisés par leur petite taille, leur forte densité et la taille importante des objets bâtis présents. A partir de ces constats, nous avons utilisé une sélection multicritères ELECTRE TRI, basée sur les critères suivants par ordre d'importance:

- la densité bâtie de l'ilot urbain, c'est-à-dire la somme des tailles de ses bâtiments divisée par sa taille totale ;
- la distribution de l'aire de ses bâtiments, comparée à celle de toute l'aire urbaine, pour identifier les bâtiments importants ;
- l'aire de l'ilot urbain, comparée à celle de tous les ilots de l'aire urbaine, pour détecter les ilots relativement petits ;
- la densité bâtie de ses voisins, pour détecter plus facilement les ilots à l'intérieur du centre-ville qui ne correspondraient pas tout à fait aux caractéristiques précédentes ;
- la distance au centroïde de l'aire urbaine, pour détecter plus facilement les ilots proches du centre-ville.

Pour chacun de ces critères, l'algorithme **calcule des relations d'ordre entre les ilots**, en les classant du plus au moins dense par exemple. Il agrège ensuite ces relations d'ordre, pour identifier les ilots les mieux classés par l'ensemble des critères, donc plus susceptibles d'appartenir au centre-ville. Ici, des seuils véto permettent de court-circuiter cette agrégation, si un ilot est extrêmement plus dense que le reste des ilots de la zone par exemple. Cet algorithme nous a donné des **résultats que nous jugeons plutôt bons**, illustrés par la Figure 114 sur les communes de Saint-Jean-de-Luz et Ciboure. La configuration spécifique de ces villes portuaires aurait pu poser problème, le centroïde de l'aire urbaine étant particulièrement éloigné du centre-ville, mais les densités très importantes ont suffi à détecter le centre-ville. Néanmoins, la pondération de cette méthode reste perfectible, car elle détecte à tort certains ilots n'appartenant pas au centre-ville, notamment lorsque les bâtiments sont très importants (ilot en bas de la Figure 114).

Figure 114. Détection des ilots du centre-ville en marron foncé dans les communes portuaires de Saint-Jean-de-Luz et Ciboure, par notre méthode de sélection multicritères.

Dans un second temps, pour caractériser le reste des ilots urbains, nous utilisons une méthode de **classification des bâtiments**, proposée par [Steiniger et al., 2008] et basée sur des critères sémantiques (attribut *nature*) et géométriques. Nous avons ainsi pris en compte les **caractéristiques individuelles** comme la forme (nombre de sommets, équarrité, élongation, compacité) et l'aire de la géométrie, mais aussi des **caractéristiques relatives au voisinage**, comme la densité avoisinante, en partant du postulat que ces caractéristiques changent en fonction de la nature du tissu urbain. Cette méthode est basée sur une classification SVM (*Support Vector Machine*), qui classent les bâtiments en 5 classes proposées par [Steiniger et al., 2008] : centre-ville, urbain, péri-urbain, industriel et rural. Puis la classe d'un ilot est déterminée **comme la classe majoritaire parmi ses bâtiments**, ou comme *hétérogène* si aucune majorité ne ressort. La Figure 115 présente les résultats de cette classification.

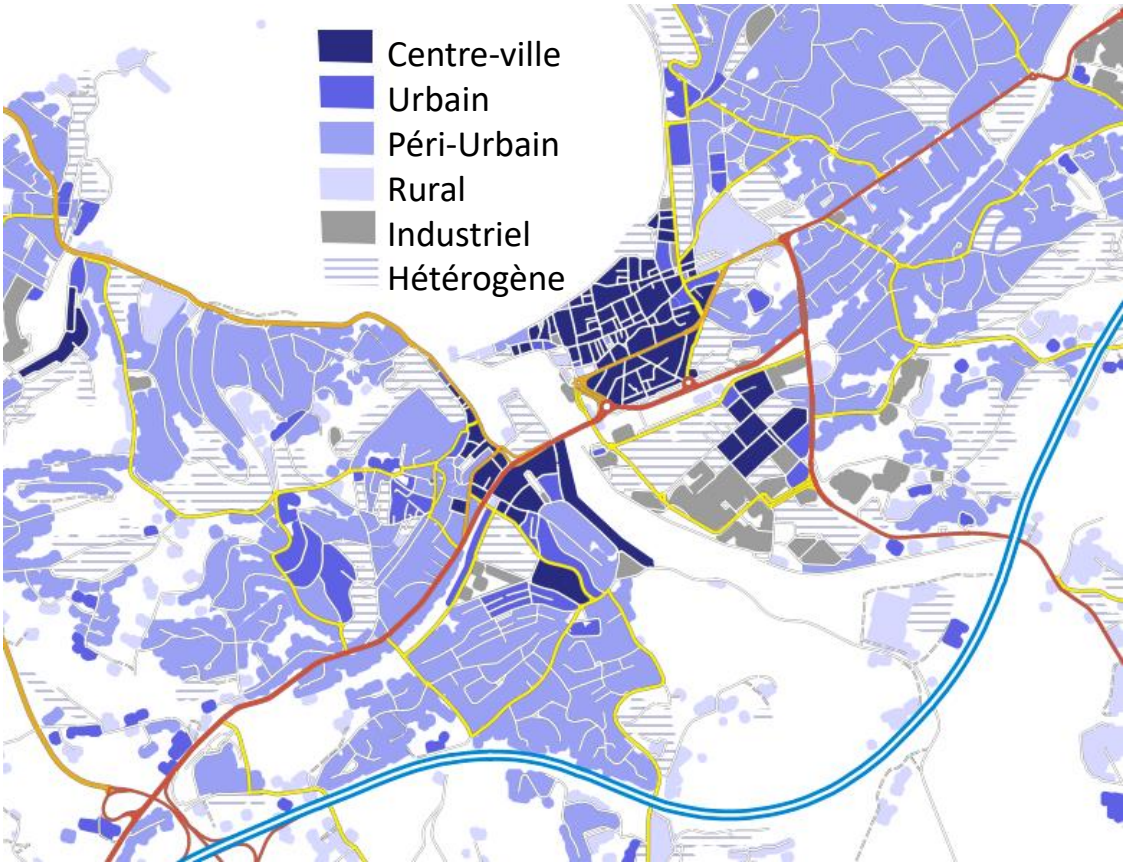


Figure 115. Résultats de la classification des ilots urbains à partir de la classification automatique des objets bâtis. Ici, ce sont les géométries agrégées des bâtis qui sont représentées et non pas les ilots.

En observant ces résultats nous constatons que si le centre-ville et les ilots industriels semblent bien détectés, le processus semble avoir eu **plus de mal à discriminer les espaces urbains et péri-urbains**. De plus, une grande partie des ilots ne présentent aucune classe majoritaire et sont classés hétérogènes. Il est donc difficile à partir de ces résultats de déterminer une évolution du grisage entre les représentations intermédiaires, qui serait progressive au fil des échelles.

Pour obtenir un résultat plus satisfaisant, nous avons donc choisi de **sélectionner manuellement les ilots à griser de chaque représentation**, en nous basant sur ces résultats automatiques et sur l'observation des données initiales. De cette façon, nous avons pu contrôler la logique et la progressivité de la force d'agrégation au fil des échelles. En plus de la densité bâtie, il nous a semblé important de respecter **une certaine contiguïté entre les ilots grisés à différentes échelles, à partir**

du centre-ville. Le résultat de cette agrégation progressive sur un extrait de notre zone d'étude est présenté dans la Figure 116.

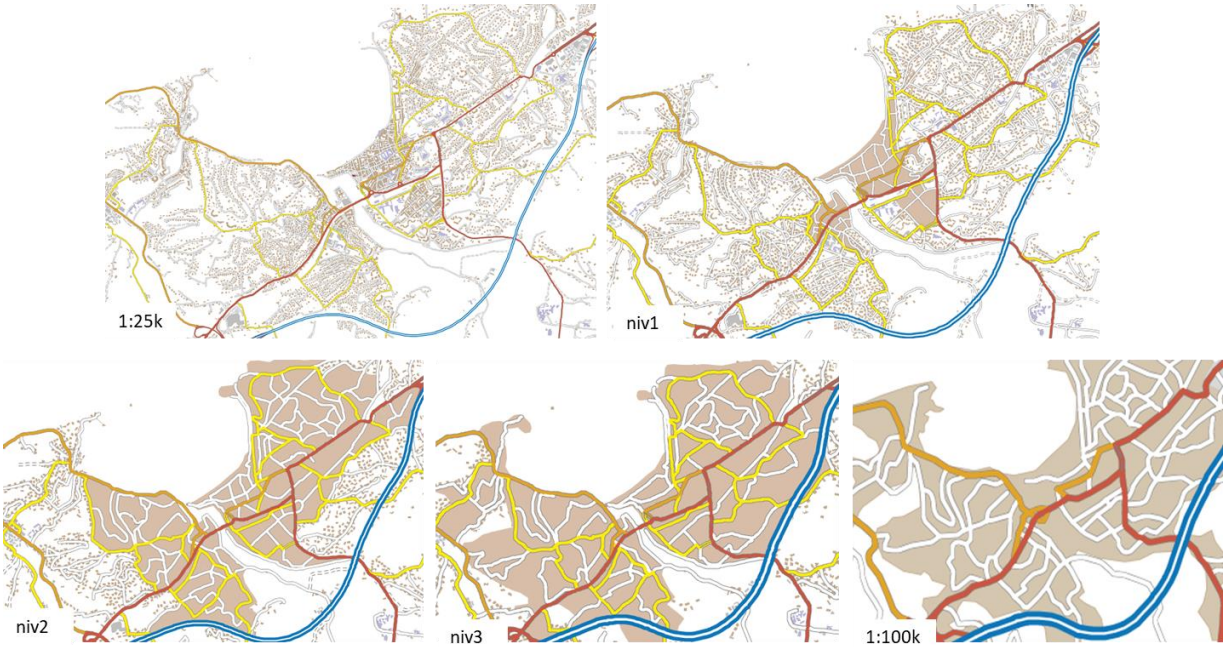


Figure 116. Résultats de notre processus de sélection manuelle, à partir des résultats automatiques, des ilots urbains à griser au fil des échelles.

Si l'on compare les résultats de la classification automatique à ceux de notre sélection manuelle, nous avons globalement :

- griser des ilots du centre-ville dans la représentation de niveau 1,
- griser des ilots péri-urbains et industriels dans la représentation de niveau 2,
- griser des ilots plutôt hétérogènes dans la représentation de niveau 3,
- laisser les ilots ruraux apparaitre dans la représentation existante au 1 : 100k.

Visuellement, la taille de la surface grisée semble évoluer progressivement entre le 1 : 25k et le 1 : 100k, mais pas forcément de manière régulière. L'agrégation semble plus rapide entre les représentations niv1 et niv2 qu'entre les autres représentations. Néanmoins, cette évolution nous semble **cohérente avec la distribution de la densité bâtie** sur notre zone d'étude.

Les résultats de la Figure 116 soulèvent deux nouvelles problématiques concernant la production de cette pyramide par agrégation progressive. La première concerne la couleur choisie pour représenter les ilots grisés. Si elle est trop claire comparée à la symbolisation des objets bâtis, elle peut effacer les différences de densité dans la carte. Au contraire si elle est trop foncée, elle peut accentuer ces différences de densité et ne plus refléter la vraie nature de l'espace géographique. Dans notre cas en particulier, cette couleur peut ainsi impliquer des problèmes de lisibilité. La couleur utilisée actuellement dans la légende standard de Scan Express est assez clair, ce qui implique un faible contraste avec les routes locales comme le montre la Figure 117. Utiliser une couleur plus foncée comme dans la Figure 116 permettrait d'améliorer leur lisibilité, mais rendrait les repères visuels conservés peu lisibles. Dans notre cas, nous choisirons donc la couleur de nos ilots urbains en fonction des résultats de la pyramide construite par préservation des repères visuels, pour assurer leur lisibilité. La même symbolisation sera ensuite utilisée pour les ilots de toutes nos pyramides.

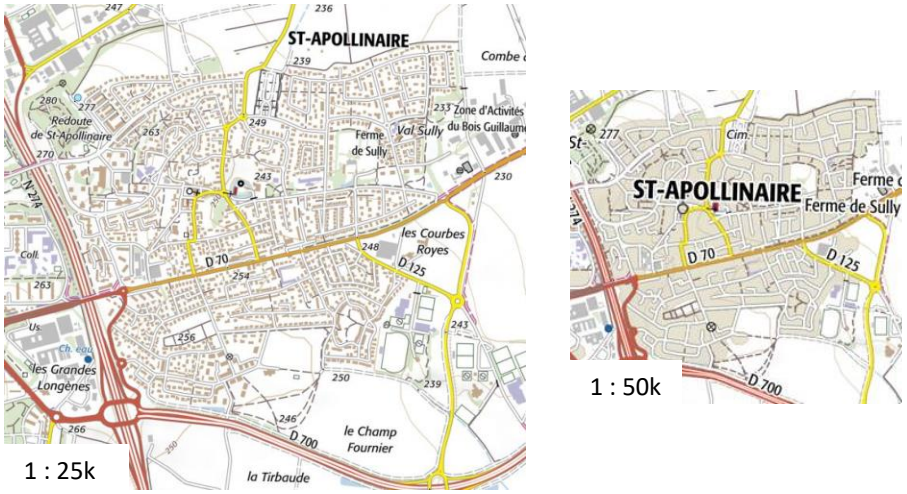


Figure 117. Symbolisation des ilots urbains dans la légende Scan Express standard.

La seconde problématique de représentation concerne la **généralisation du bâti dans les ilots non grisés**. En effet, si les bâtiments en zone urbaine sont rapidement couverts par les ilots grisés, certains bâtiments plus isolés restent affichés à petite échelle. Il est donc nécessaire de simplifier leur géométrie pour assurer leur lisibilité. A l'instar de l'ICGC Catalogne dont les travaux sont illustrés par la Figure 118, nous choisissons ici de **typifier ces bâtiments**. En pratique pour construire chaque représentation intermédiaire, nous utilisons donc la représentation produite pour la pyramide typification, en ajoutant par-dessus les ilots grisés correspondants. Un extrait de la pyramide ainsi construite par agrégation progressive est présenté en Annexe G.4.

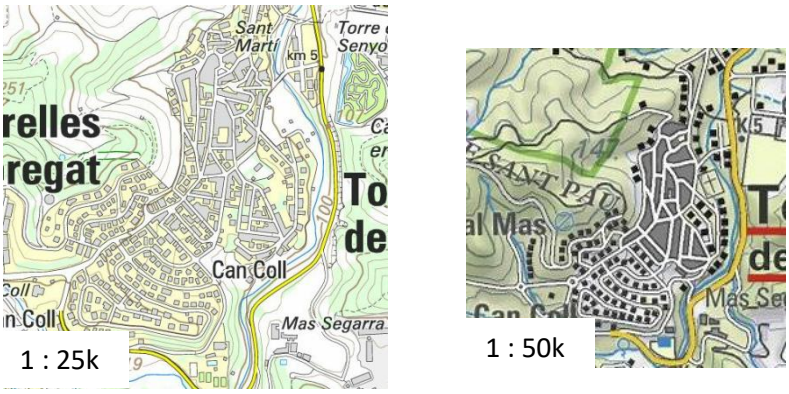


Figure 118. Exemple d'utilisation d'un processus d'agrégation en ilots urbains dans la pyramide de l'ICGC Catalogne, où le reste des bâtiments sont typifiés.

Comme mentionné précédemment, cela nous permettra de comparer les résultats de notre test utilisateurs entre la pyramide obtenue par typification et la pyramide obtenue par agrégation progressive, pour évaluer notre hypothèse C2.

D.4.5. Variante avec Préservation des Repères Visuels

Notre hypothèse C3 sur l'influence de la **préservation des repères visuels** s'appuie sur les théories existantes en sciences cognitives sur l'utilisation des points de repères ou *landmarks* en anglais, pour des tâches de navigation [Couclelis et al., 1987 ; Golledge 1992 ; Sorrows et Hirtle, 1999]. L'idée initiale de ces travaux est que dans n'importe quel environnement, il existe des éléments qui ressortent, de par leurs caractéristiques distinctives ou parce qu'ils portent une symbolique

personnelle pour l'utilisateur ou une utilité particulière pour la tâche accomplie. Par définition, ces objets sont faciles à percevoir, à mémoriser et à retrouver dans l'environnement (physique ou virtuel). **Ils peuvent donc aider l'utilisateur à se repérer dans l'espace, suivre des objectifs directionnels ou réaliser des tâches de navigation cartographique**.

Lors d'un changement de niveau d'abstraction entre deux représentations à différentes échelles, l'utilisateur ne peut plus s'appuyer sur les éléments détaillés qui lui servent de repères visuels, car ils sont éliminés. Nous pensons donc que **préserver une représentation fidèle des repères visuels** est un levier d'amélioration potentielle de la fluidité de navigation. Pour pouvoir évaluer notre hypothèse C3, nous produirons cette pyramide **à partir de la pyramide construite par agrégation progressive**, en ajoutant uniquement des repères visuels au-dessus des ilots grisés.

Ces repères visuels peuvent être des objets uniques ou des groupes d'objets, comme des structures régulières par exemple. Dans notre cas d'étude, entre la représentation du bâti individuel et de l'aire urbaine, nous souhaitons **conserver une représentation détaillée des bâtiments visuellement saillants, lorsqu'ils sont recouverts par un ilot grisé**. L'IGN a fait des choix de représentation en ce sens pour sa pyramide Scan Express, comme le montre la Figure 119. Cependant, seuls les bâtiments spéciaux sont ici conservés, c'est-à-dire les bâtiments publics, industriels ou commerciaux, qui sont distingués des bâtiments quelconques par un attribut *nature* particulier dans les données et une couleur différente (violet, gris, rouge) dans la carte. Ici, seule la variable visuelle couleur est prise en compte pour sélectionner ces bâtiments. D'autres bâtiments, saillants par leur taille, leur forme ou leur position sont donc éliminés par la généralisation. Par ailleurs, si la géométrie de ces repères est grossie après le changement d'échelles, elle n'est pas simplifiée et présente parfois des problèmes de lisibilité. Cet exemple soulève donc les deux problématiques de cette pyramide : **comment sélectionner les objets pouvant potentiellement servir de repères visuels et comment préserver leurs caractéristiques visuelles saillantes à petite échelle, tout en assurant leur lisibilité ?**

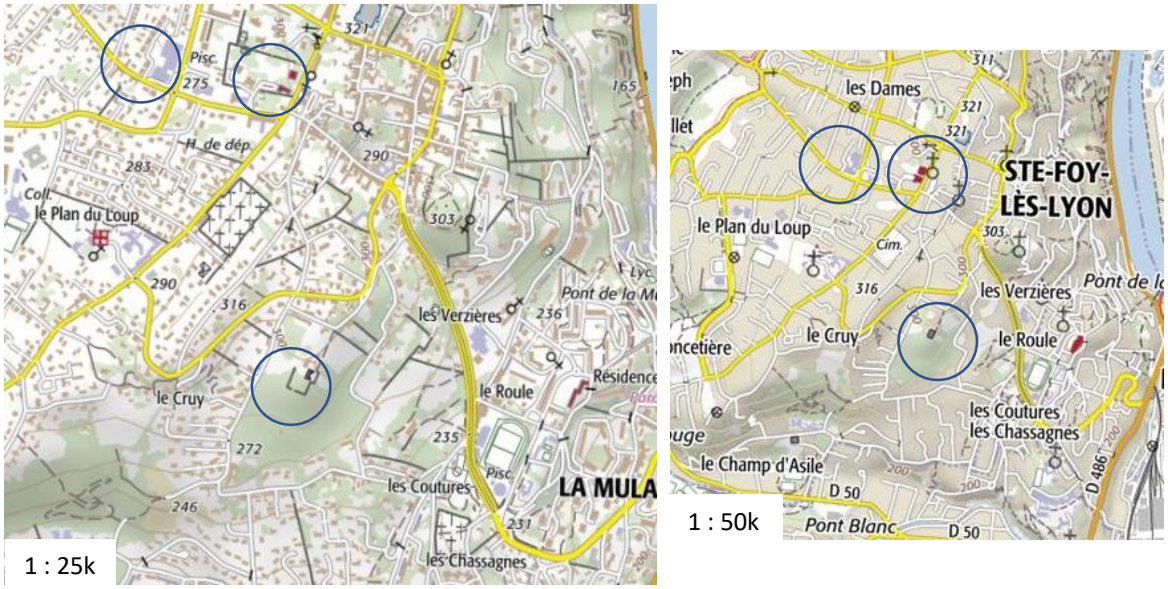


Figure 119. Préservation d'une représentation détaillée des bâtiments spéciaux (en rouge, violet, gris) au-dessus des ilots urbains dans la carte au 1 : 50k de la pyramide Scan Express. Si la géométrie de ces bâtiments est grossie, elle n'est pas simplifiée et présente parfois des problèmes de lisibilité à petite échelle.

Pour détecter automatiquement des repères visuels dans nos données, nous nous sommes inspirés des travaux de [Elias 2003] qui propose une méthode d'apprentissage automatique, basée sur les caractéristiques visuelles des objets. Comme détaillé dans [Touya et Dumont, 2017], nous avons ici pris en compte à la fois des **caractéristiques intrinsèques** des bâtiments et des **caractéristiques de leur voisinage**. Voici la liste exhaustive de ces critères :

- la couleur de l'objet cartographique qui révèle sa sémantique (attribut *nature*) ;
- la granularité, l'équarrité [Lokhat et Touya, 2016], la compacité, l'élongation et l'orientation de sa géométrie pour détecter des formes saillantes ;
- la distance au carrefour routier le plus proche pour détecter une position saillante dans l'ilot ;
- le nombre d'objets bâtis adjacents (distance nulle), des bâtiments collés étant détectés visuellement comme étant un seul par l'utilisateur ;
- le nombre d'objets bâtis et la densité bâtie dans un rayon de 100m, pour détecter les bâtiments isolés, plus saillants.

A partir de la description des bâtiments avec ces critères, l'algorithme établit un arbre de décision, en attribuant à chaque objet un coefficient de confiance entre 0 et 1, concernant son statut de repère visuel. Pour extraire les repères visuels parmi nos données, il suffit ensuite de sélectionner tous les objets dont le coefficient de confiance est supérieur au seuil choisi. La Figure 120 présente les objets détectés comme repères visuels sur deux extraits de notre zone d'étude, pour un seuil de 0,97.

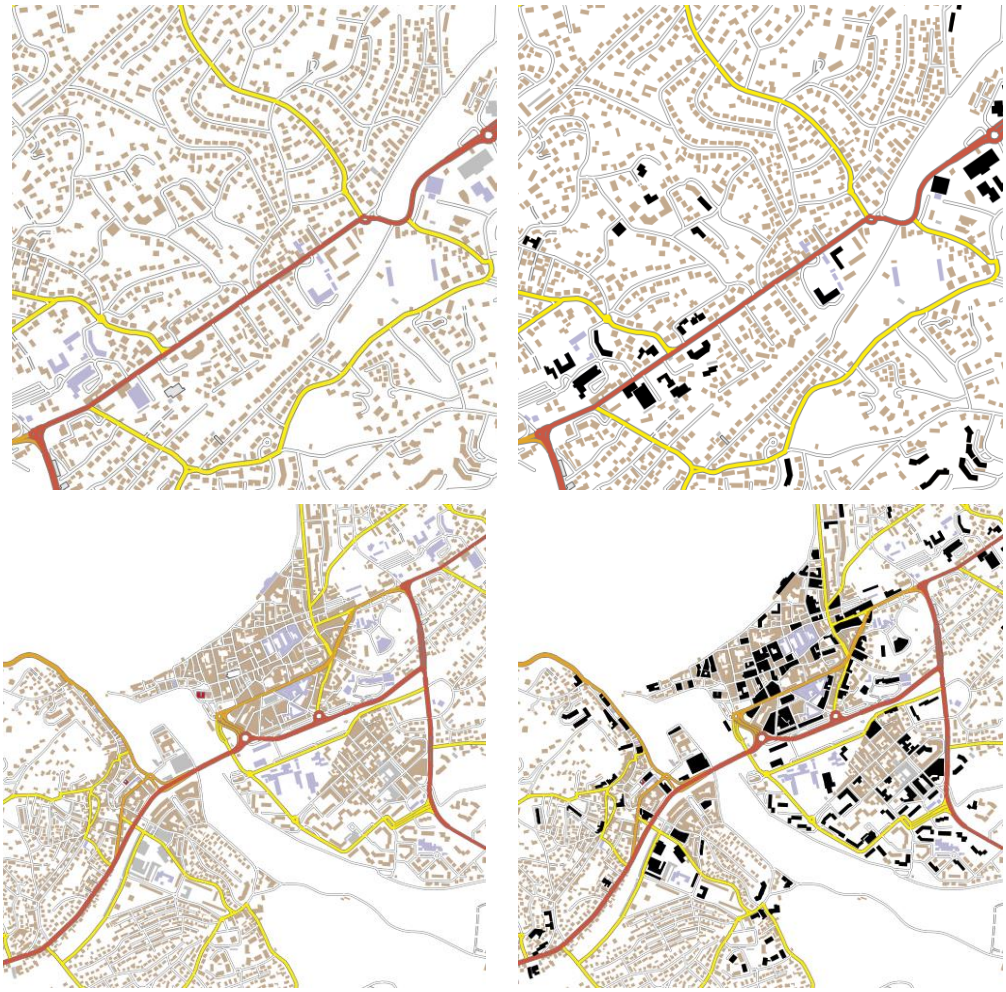


Figure 120. Objets détectés comme repères visuels (en noir à droite) sur deux extraits de notre zone d'étude (respectivement en haut et en bas), pour un coefficient de 0,97.

Dans le premier exemple (en haut), il nous semble que cet algorithme **détecte bien des repères visuels**, dans le sens où la plupart des objets détectés nous semble saillants et peu d'objets saillants ne sont pas détectés. En revanche sur le second exemple, nous identifions **les limites de cette méthode**. En centre-ville et dans les ilots industriels, les bâtiments ont souvent des caractéristiques visuelles saillantes par rapport à l'ensemble de la carte, mais pas particulièrement remarquables par rapport aux autres bâtiments de l'ilot ou du voisinage. Disposer de plus d'exemples d'apprentissage permettrait sans doute d'améliorer la détection automatique des repères visuels.

Ces résultats soulèvent d'autres questions sur la pertinence de cette méthode. D'une part, la saillance visuelle d'un objet cartographique peut changer en fonction de l'échelle, puisqu'elle dépend entre autre de sa taille qui varie, ou de sa position par rapport au réseau routier, qui lui aussi est transformé par la généralisation. **Détecter des repères visuels dans les données sources et non pour chaque représentation est sans doute une erreur ici**. D'autre part, la quantité de repères visuels détectés est très importante dans les exemples de la Figure 120, ce qui n'est pas cohérent avec le principe même des points de repère : l'utilisateur mémorise ou reconnait certains éléments particuliers dans l'espace, qui sont donc forcément en nombre limité. Le coefficient de confiance de notre méthode permet théoriquement de jouer sur la quantité d'objets détectés, mais diminue aussi la qualité de la détection. Il serait ici nécessaire **d'être plus strict sur les critères d'analyse eux-mêmes**. La méthode utilisée [Elias 2003] étant basée sur des tâches de navigation dans l'espace, une piste d'amélioration serait d'utiliser des critères plus adaptés à la détection d'éléments saillants dans une représentation cartographique. Les travaux récents de [Weng et al., 2017] proposent ainsi une méthode d'extraction de repères intéressante, en considérant différents critères selon l'échelle.

Pour produire notre pyramide et pour disposer à l'avenir d'un jeu d'entrainement de qualité pour nos algorithmes d'apprentissage automatique, nous avons donc utilisé une **sélection manuelle des repères visuels réalisée par un expert cartographe**. En plus des critères mentionnés plus haut, cette sélection manuelle s'est appuyée sur une **exploration multi-échelle de la pyramide**, pour valider la nécessité locale de points de repère et les choix de quantité, de répartition spatiale et d'objets conservés, pour les ilots grisés uniquement. Cette expertise a aussi considéré la possibilité **qu'un groupe de bâtiments soit un point de repère potentiel**, alors que les objets qui le composent ne le sont pas individuellement, ce qui n'est pas géré par notre méthode automatique. La Figure 121 compare ainsi les points de repère sélectionnés manuellement à ceux détectés par la méthode automatique.

Outre son aspect fastidieux, la principale difficulté de cette méthode est aussi celle de la méthode automatique, à savoir le choix des critères faisant d'un objet un repère visuel. **Il n'est pas évident de détecter les repères visuels potentiels, qui sont parfois utilisés inconsciemment ou de façon très personnelle par l'utilisateur pendant une tâche de navigation** [Couclelis et al., 1987]. Deux experts ont ainsi contribué à cette sélection et ne sont pas toujours tombés d'accord sur la nature d'un repère visuel.

Nous nous sommes aussi interrogés sur la quantité et la répartition spatiale des repères visuels à sélectionner ici. Par définition, les repères visuels sont plutôt des exceptions et trop en préserver pourrait être néfaste à leur utilité. Nous nous sommes donc efforcés de sélectionner un minimum d'objets, qui puissent être assimilés comme points de repère par une majorité d'utilisateurs. En ce qui concerne leur répartition, nous choisissons de **sélectionner localement des repères visuels, de**

manière à ce que l'ensemble de notre zone d'étude en soit pourvu. Nous appliquons ici l'idée de [Couclelis et al., 1987] que les points de repères servent à structurer et hiérarchiser la carte mentale de l'utilisateur, en créant une sorte de triangulation de l'espace. Utiliser suffisamment de repères visuels, relativement bien répartis, permettrait donc à l'utilisateur d'avoir des points sur lesquels s'appuyer sur l'ensemble de la zone.

Figure 121. Comparaison entre les points de repère potentiels détectés par la méthode automatique (à gauche) et ceux sélectionnés manuellement par un cartographe (à droite).

La seconde problématique de cette pyramide concerne **les choix de représentation de ces repères visuels à petite échelle**, pour préserver le niveau de détail tout en assurant leur lisibilité. En ce qui concerne leur symbolisation, nous avons choisi d'adapter les couleurs existantes pour la représentation du bâti, en optimisant le contraste avec la couleur des ilots urbains. Nous faisons ici l'hypothèse que ces changements de couleur des bâtiments sont suffisamment légers pour ne pas perturber l'utilisateur. Pour encore améliorer la lisibilité des repères visuels, nous avons également choisi de simplifier leur géométrie en la grossissant et en supprimant les détails illisibles, tout en conservant ses caractéristiques visuelles saillantes. Par manque de temps et d'algorithme capable de détecter et de préserver ces caractéristiques, ces modifications ont été réalisées manuellement.

Un extrait de la pyramide finalement construite par agrégation progressive avec préservation des repères visuels est présenté en Annexe G.5.

A partir de nos hypothèses d'amélioration de la fluidité de navigation dans une carte multi-échelle, nous avons proposé **quatre alternatives pour la transition de représentation** du bâti, entre les représentations Scan Express existantes au 1 : 25k et au 1 : 100k, en utilisant des processus de généralisation différents. A partir des résultats de ces processus, nous allons maintenant construire nos pyramides raster tuilées et définir notre système de visualisation multi-échelle.

D.5. Création et Visualisation des Pyramides

Rappelons qu'une pyramide cartographique est composée de cartes à différentes échelles, elles-mêmes obtenues à partir de bases de données cartographiques vectorielles. Dans les parties précédentes, nous avons présenté la production de ces bases de données pour les cinq pyramides

impliquées dans notre test utilisateurs. Dans cette partie, nous détaillons le processus automatique utilisé pour tuiler et rastériser chacune de ces cartes (§D.5.1). Puis nous justifions notre choix de système de visualisation multi-échelle pour notre expérience (§D.5.2) et présentons la configuration permettant de visualiser nos pyramides (§D.5.3).

D.5.1. Processus de Rastérisation et de Tuilage Automatique

Pour créer une carte multi-échelle à partir de bases de données cartographiques, il nous faut **tuiler** ces données, c'est-à-dire les découper selon un quadrillage, mais aussi les **rastériser**, donc les transformer au format image. Pour cela, des serveurs WMS ou des librairies open source transformant des données vectorielles au format raster sont disponibles, comme GeoServer[1] ou GDAL[2]. Ces outils sont néanmoins limités à la suite d'échelles définie par le standard WMTS. GeoServer comme la commande *gdal2tiles* de GDAL prennent ainsi en paramètre le niveau de zoom WMTS pour calculer la résolution équivalente des tuiles à cette échelle. Or dans notre cas, comme nous ajoutons de nouveaux niveaux de zoom intermédiaires, l'utilisation de ces outils n'est pas possible. Il nous faut donc un système plus paramétrable pour choisir la taille des tuiles à générer, même lorsque celle-ci ne suit pas le standard.

Pour cela, nous utilisons un processus implémenté dans GeOxygene[3], appelé ***GeoxBatchRenderer***. Ce processus prend en paramètre l'emprise de la zone globale et les dimensions du tuilage à générer, c'est-à-dire le nombre de tuiles par ligne et par colonne. Le processus calcule ainsi à partir de ces paramètres l'emprise de chaque tuile, charge et affiche les données symbolisées comprises dans cette emprise et enregistre une image de ce rendu, au format 256*256 pixels, taille standard d'une tuile. En pratique, il est nécessaire d'afficher une emprise légèrement plus grande, comme le fait GeoServer, pour éviter les artefacts ou les erreurs de chargement sur les bords. Ce processus génère toujours quelques problèmes (toponymes à cheval sur deux tuiles, enregistrement avant la fin de l'affichage etc.) et la génération complète des pyramides a été relativement longue. Pour limiter ces écueils, nous avons isolé les toponymes du contenu cartographique et les rajouterons directement comme des objets vectoriels dans notre système de visualisation. Comme nous l'avons déjà mentionné, cette astuce nous permettra également d'améliorer la cohérence de leur placement et de leur taille entre les échelles.

Pour calculer le **nombre de tuiles nécessaires** pour chacune de nos représentations intermédiaires, nous sommes partis du nombre de tuiles standard utilisé pour les représentations existantes sur notre zone d'étude, aux niveaux de zoom 12 à 14. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur les résolutions m/px du Tableau 2, fournies par l'IGN en Lambert 93[4] (projection officielle française), d'après les recommandations du standard WMTS.

On calcule ensuite la surface terrain devant être représentée par une tuile (delta m/tuile), en multipliant cette résolution par la taille de tuile recommandée par le standard WMTS de 256*256 pixels. Pour trouver le nombre de tuiles nécessaires, nous divisons ensuite la taille terrain de notre emprise géographique par ce delta. Notre zone d'étude n'étant pas un multiple de ce delta, nous arrondissons le nombre de tuiles à l'entier supérieur, ce qui revient à couvrir une zone plus grande,

[1] http://geoserver.org/
[2] http://www.gdal.org/
[3] par Imran Lokhat, membre de l'équipe COGIT
[4] https://geoservices.ign.fr/documentation/geoservices/wmts.html#r%C3%A9solutions---niveaux-de-zoom

comme l'illustre la Figure 122. En pratique, certaines tuiles en bord de zone seront donc partiellement vides. Ici, cette absence de données ne risque pas de poser de problème pour nos utilisateurs, car elle sera confondue avec le fond de l'interface de navigation utilisée pour notre test.

Niveau WMTS	Échelle d'affichage	Résolution (m/px)	Delta (m/tuile)
12	1 : 45570	12,7597836936	3266,5046255616
13	1 : 22785	6,3798916360	1633,252258816
14	1 : 11393	3,1899457653	816,6261159168

Tableau 2. Résolution m/px fournie par l'IGN d'après les recommandations du standard WMTS, pour les trois niveaux de zoom que nous utiliserons.

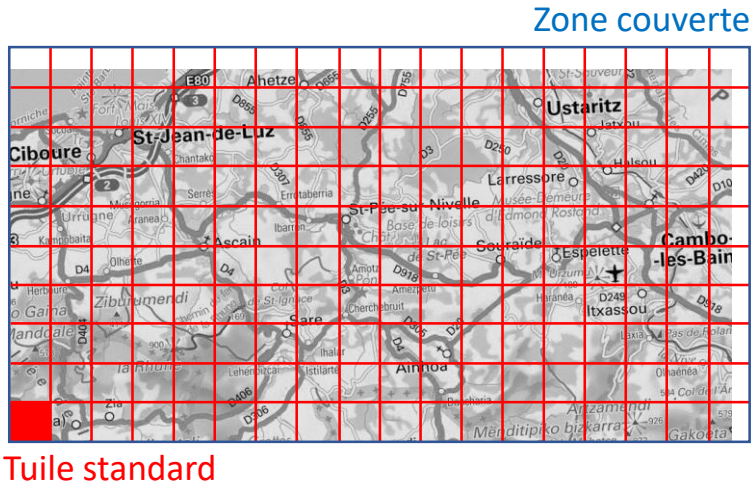


Figure 122. Illustration du calcul du nombre de tuiles nécessaires pour chaque représentation. Ici, pour garder des tuiles carrées et régulières comme le recommande le standard, le quadrillage couvre une zone plus grande que notre zone d'étude.

Le Tableau 3 indique le nombre de tuiles que nous avons ainsi calculé pour les représentations existantes (en gras). Puis, pour chacune de nos représentations intermédiaires nous avons d'abord calculé leur résolution, à partir de l'échelle d'affichage visée (1 : 20k, 1 : 30k et 1 : 40k). Ces résolutions sont calculées en prenant comme taille de pixel 0.28*0.28 mm, qui correspond à un écran considéré comme standard d'après la documentation WMTS. La résolution est donc approximativement égale au dénominateur de l'échelle d'affichage multiplié par 0.00028. Puis de la même façon que pour les représentations existantes, nous avons calculé le delta terrain et le nombre de tuiles nécessaires sur notre zone d'étude.

Représentation	**1 : 25k**	Niv1	**Niv2**	Niv3	**1 : 100k**
Nombre de tuiles nécessaires	**36*20**	27*15	**18*10**	13*7	**9*5**

Tableau 3. Nombre de tuiles utilisé pour construire chacune des représentations de nos pyramides.

Précisons ici que le nombre de pixels comme de tuiles devant être entiers, nous faisons déjà ici certaines approximations. Ajouter des représentations intermédiaires nous fait aussi sortir du quadtree du standard WMTS et nous ne sommes pas assurés de la compatibilité avec les systèmes de visualisation standard et la qualité du rendu d'une telle pyramide. Nous devrons donc prendre en compte les capacités des systèmes de visualisation à lire de telles pyramides pour choisir celui utilisé

dans notre expérience. Nous présentons ces choix dans la partie suivante §D.5.2, puis nous détaillons dans la partie §D.5.3 la configuration nécessaire pour visualiser de telles pyramides.

D.5.2. Choix du Système de Visualisation Multi-Échelle

Pour mener à bien notre expérience, nous avons besoin d'un système permettant la visualisation de pyramides cartographiques, c'est-à-dire l'affichage et la **navigation multi-échelle** dans de telles cartes. Dans notre cas d'étude en particulier, ce système doit aussi permettre un zoom continu, ainsi que le choix des intervalles d'échelles d'affichage des différentes représentations cartographiques. Pour notre test utilisateurs et selon la tâche que nous choisirons, nous aurons également besoin **d'afficher des éléments graphiques** en surcouche de nos cartes. De manière générale, nous devrons également trouver un moyen de programmer l'enchainement des différentes phases du test et de **mesurer les interactions** de nos participants avec l'interface, comme les opérations de zoom, pour évaluer la fluidité de navigation.

A priori, les systèmes de visualisation cartographique multi-échelle **OpenLayers et Leaflet** pourraient correspondre à nos besoins en termes de visualisation et de navigation cartographique. Ces outils sont des bibliothèques libres JavaScript qui permettent assez facilement d'intégrer une interface de navigation cartographique **dans une page web**, en proposant un **paramétrage relativement poussé** de ses contrôles. Ces technologies sont notamment utilisées par la communauté OpenStreetMap, mais aussi par l'IGN qui propose des extensions de ces bibliothèques pour afficher des données IGN dans une interface web. OpenLayers comme Leaflet proposent maintenant un zoom continu, le paramétrage des échelles ou résolutions des niveaux de zoom utilisés pour la navigation, ainsi que celui des intervalles d'affichage de chaque couche cartographique. En revanche, ces systèmes attendent impérativement une pyramide tuilée selon un quadtree standard et nos premiers tests d'affichage **ne se sont pas révélés concluants** pour la visualisation de nos pyramides.

Face à ces problèmes, nous nous sommes intéressés au système **ZVTM**[1] (*Zoomable Visual Transformation Machine*) [Pietriga 2005], développé par les chercheurs en IHM avec qui nous collaborons sur le projet MapMuxing. Ce module Java propose des outils relativement faciles à prendre en main, pour développer une interface de visualisation permettant une navigation multi-échelle dans un espace virtuel. Une modélisation extensible permet de créer, d'afficher et d'animer des éléments graphiques, voire de proposer des actions interactives. Ces éléments graphiques peuvent être des objets vectoriels, ou bien des images comme des tuiles cartographiques. En particulier, ZVTM est agrémentée d'une API nommée ZUIST, permettant de paramétrer **l'affichage de différentes couches cartographiques à partir d'un fichier XML**. Il nous sera donc assez facile d'y afficher nos pyramides, en choisissant les intervalles d'échelles d'affichage de chaque représentation cartographique. Développé par des chercheurs en IHM, ce système permet également de contrôler l'ensemble de l'interface, notamment les niveaux et le système de zoom utilisés (continu, animé ou discret). ZVTM propose également des outils pour enregistrer les interactions de l'utilisateur : navigation, opérations de zoom, clics souris, etc. Il nous semble donc pertinent d'utiliser cet outil pour notre expérience.

D.5.3. Configuration du Format des Pyramides Produites

Dans cette partie, nous détaillons uniquement la configuration de l'arborescence de dossiers et du

[1] http://zvtm.sourceforge.net/

fichier XML nécessaires à la visualisation de nos pyramides dans ZVTM. Il nous semble important de développer ici ces aspects techniques, car ils conditionnent l'utilisation de nos pyramides et donc la faisabilité de nos hypothèses d'amélioration. Nous détaillerons ensuite la modélisation de l'ensemble de l'interface et de notre test utilisateurs dans le Chapitre E.

Tout comme OpenLayers ou Leaflet, ZVTM peut lire les différentes tuiles de nos pyramides à partir d'une arborescence de dossiers spécifique, illustrée par la Figure 123. A la racine de cette arborescence, on retrouve le fichier de configuration scene.xml dont nous expliquons la structure dans la suite de ce paragraphe. Le premier niveau de l'arborescence correspond au *level* c'est-à-dire à un niveau spécifique de la pyramide, de 4 pour la carte au 1 : 25k à 0 pour la carte existante au 1 : 100k. Ensuite pour chaque niveau, les tuiles sont ordonnées en fonction de leur position dans la grille de tuilage, en commençant en bas à gauche par la tuile 0-0. Le deuxième niveau de l'arborescence correspond ainsi à la colonne de la grille de tuilage, puis on retrouve chaque tuile au format image, nommée selon l'identifiant de la ligne de la grille de tuilage sur laquelle elle est affichée. Dans l'exemple de la Figure 123, on obtient ainsi pour le niveau 0, c'est-à-dire la carte existante au 1 : 100k, 9 dossiers correspondant aux colonnes et 5 images correspondant aux lignes.

Figure 123. Arborescence de dossiers attendue par ZVTM pour les pyramides raster tuilées.

Le fichier scene.xml nous permet ensuite de **configurer les intervalles d'échelles d'affichage** de chaque niveau et les **coordonnées de chaque tuile** dans l'interface de visualisation. En pratique, tous les éléments graphiques affichés par ZVTM sont en effet définis dans un espace plan infini, observé par une caméra dont l'altitude par rapport à ce plan peut varier. L'utilisateur verra ainsi sur son écran ce que cette caméra voit de l'espace virtuel en fonction de sa position (x, y) dans un repère orthonormé, et de son altitude selon un axe vertical. Plus la caméra monte en altitude, plus les objets définis dans l'espace virtuel seront affichés petits. L'échelle d'affichage dans ZVTM est donc gérée par l'altitude de cette caméra, définie à partir de l'altitude 0 où se trouve l'espace virtuel.

Pour que les différents niveaux de nos pyramides apparaissent correctement dans ce système de visualisation, **il faut qu'ils occupent la même emprise dans l'espace virtuel**. Cependant, leur taille réelle est différente (en pixels), puisque le nombre de tuiles dans chaque niveau est différent. Moins les niveaux sont détaillés plus nous devrons agrandir la taille de leur tuile dans l'espace virtuel ZVTM, comme le montre la Figure 124. Nous devons donc maintenant définir les coordonnées de chaque tuile de chaque niveau dans l'espace virtuel, de manière à ce qu'elles apparaissent au bon endroit et

à la bonne taille. Pour clarifier notre propos, nous parlons dans cette partie *d'unité de l'espace virtuel* (UEV) pour désigner une distance dans le repère orthonormé de l'espace virtuel ZVTM.

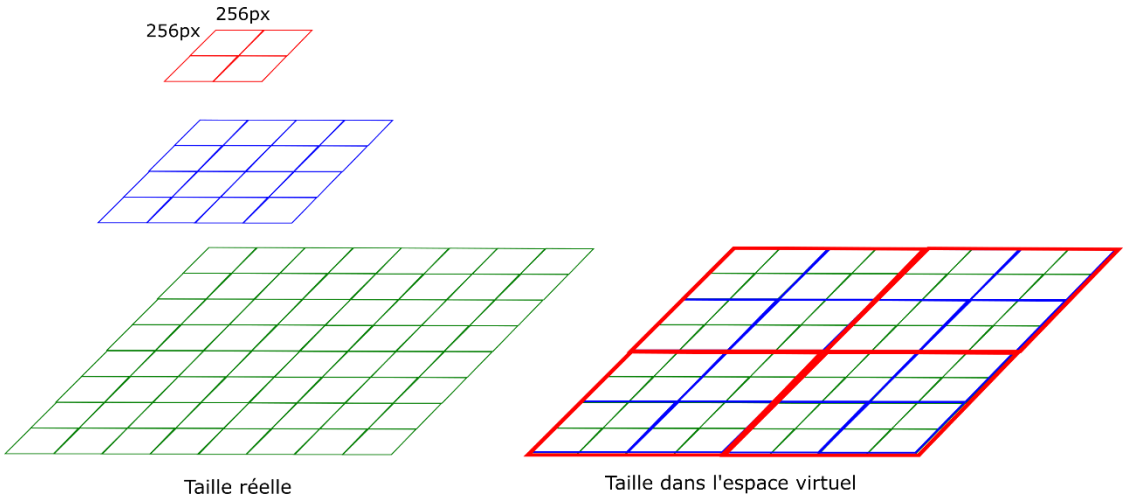


Figure 124. Illustration de la nécessité d'agrandir la taille des tuiles dans l'espace virtuel ZVTM en fonction du niveau de la pyramide, pour occuper une même emprise à l'écran.

Pour calculer les **coordonnées des tuiles dans l'espace virtuel**, nous avons pris comme référence la carte existante au 1 : 25k, qui sera notre premier niveau. Ses tuiles seront donc affichées avec une taille de 256*256 UEV dans notre interface de test. L'emprise occupée par la carte dans l'espace virtuel est donc de 256*36 UEV en largeur et 256*20 UEV en hauteurs, car le niveau 4 (carte au 1 : 25k) comprend 36*20 tuiles. Chacune des représentations de la pyramide doit occuper cette même emprise. Pour chaque niveau, nous avons donc divisé cette emprise par leur nombre de tuiles correspondant, pour définir la taille d'une de ses tuiles à l'écran, donnée dans le Tableau 4.

Niveau	4	3	2	1	0
Taille de tuile	256*256 UEV	341*341 UEV	512*512 UEV	731*731 UEV	1024*1024 UEV

Tableau 4. Taille des tuiles dans l'espace virtuel ZVTM en fonction de leur niveau d'affichage.

Comme on pouvait malheureusement s'y attendre, nous tombons ici sur l'une des limites de notre approche. Ce calcul ne donne pas un nombre de pixels entiers pour les niveaux 3 et 1 qui sortent du quadtree. Nous devons donc arrondir à l'entier supérieur, créant des **décalages d'affichage** entre les différents niveaux de la pyramide. Par manque de temps, nous avons choisi ici de ne pas revenir en arrière sur notre configuration. Si ces problèmes d'affichage sont susceptibles de perturber nos utilisateurs au premier abord, nous espérons qu'une phase d'entrainement permettra de dépasser ce biais. Il est clair qu'en dehors de notre cadre expérimental, il faudra **trouver une autre solution pour afficher des représentations intermédiaires dans un système de visualisation multi-échelle**. Sur cette plage d'échelle, il serait sans doute possible d'utiliser une évolution standard de la taille des tuiles pour nos cinq niveaux (256, 512, 1024, 2048, 4096) en adaptant seulement leur échelle d'affichage. Cependant, cette pratique diminuerait rapidement la résolution des tuiles et risquerait de poser des problèmes de lisibilité à petite échelle (contenu pixellisé).

En ce qui concerne leurs coordonnées, nous choisissons de placer les tuiles dans l'espace virtuel à partir de l'origine du repère. Dans l'exemple de la Figure 125, représentant le tuilage du niveau 2, la

tuile noire est ainsi positionnée par rapport à son centroïde. Il suffit alors de multiplier les indices de sa position (7 ; 4) par la taille des tuiles à ce niveau (512*512 UEV), puis d'ajouter la moitié de la taille d'une tuile pour trouver les coordonnées du centroïde.

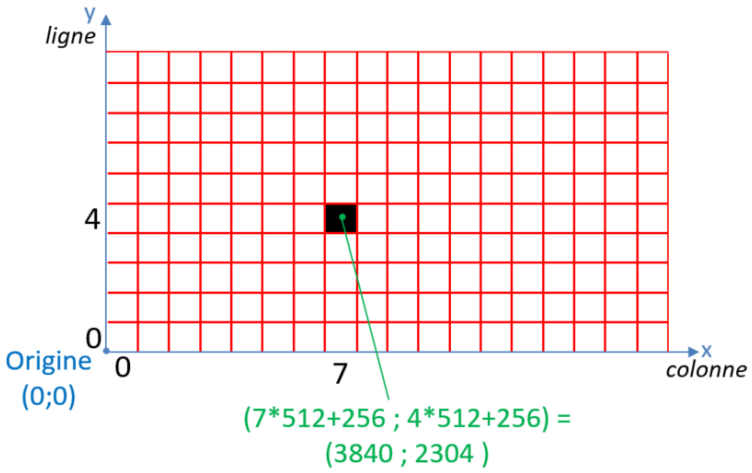


Figure 125. Illustration de la méthode de calcul des coordonnées du centroïde de la tuile en noir : on multiplie les indices de colonne-ligne à la taille des tuiles au niveau 2 (512 UEV) puis on ajoute la moitié de la taille d'une tuile (256 UEV).

Il nous faut maintenant définir les **plages d'altitudes** sur lesquelles chacun des niveaux de nos pyramides seront affichés, à partir des échelles d'affichage visées. Pour cela, nous appliquons la formule illustrée par la Figure 126, découlant du théorème de Thalès. La taille *t'* d'un élément graphique à une altitude *a* est ainsi définie en fonction de sa taille *t* dans l'espace virtuel et de la focale de la caméra *f*, fixée à 100 par défaut et que nous avons adoptée telle quelle. Ici, t' correspond à la taille à laquelle on souhaite que nos tuiles soient visualisées, c'est-à-dire à 256*256 UEV.

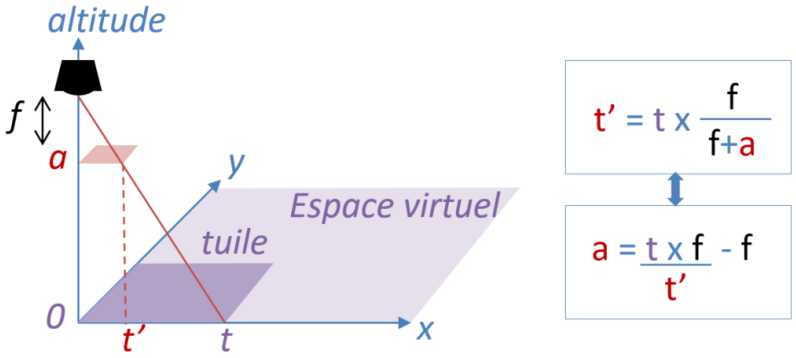


Figure 126. Méthode de calcul de la taille t' d'un élément graphique à une altitude a, en fonction de sa taille t dans l'espace virtuel et de la focale de la caméra (100 par défaut).

Ainsi pour chaque niveau, l'altitude à laquelle nos tuiles seraient affichées à pleine résolution est indiquée dans le Tableau 5 (altitude théorique). Pour assurer un zoom continu, nous définissons pour chaque niveau de la pyramide une plage d'altitudes, correspondant à un intervalle d'échelles d'affichage. Pour cela, en naviguant dans nos pyramides nous **avons affiné les plages d'altitudes de manière empirique** en vérifiant la lisibilité et l'efficacité de chaque niveau et en optimisant la progressivité des changements de représentations. Nous avons également défini ces plages d'altitudes pour notre pyramide initiale, qui ne comporte que trois niveaux, pour les trois cartes

existantes. Précisons ici que ces intervalles forment une partition de la plage d'altitudes globale. Aux bornes de ces intervalles (altitude 25, 85, 140 et 240), c'est systématiquement le niveau le moins détaillé qui est représenté, car il est affiché au-dessus.

Niveau	**4**	**3**	**2**	**1**	**0**
altitude théorique	0	33	100	185	300
plages d'altitudes utilisées (5 niveaux)	0-25	25-85	85-140	140-240	240-310
plages d'altitudes utilisées (3 niveaux)	0-25	-	25-140	-	140-310

Tableau 5. Altitudes théoriques calculées et plages d'altitudes utilisées pour les différents niveaux de nos pyramides alternatives (5 niveaux) et pour la pyramide initiale (3 niveaux).

En pratique, nous avons adapté un **script python** existant pour produire automatiquement le fichier de configuration scene.xml à partir de ces paramètres. La structure de ce fichier est illustrée par la Figure 127.

```
<scene>
    <level ceiling="25" depth="4" floor="0" />
    <level ceiling="85" depth="3" floor="25" />
    <level ceiling="140" depth="2" floor="85" />
    <level ceiling="240" depth="1" floor="140" />
    <level ceiling="310" depth="0" floor="240" />
    <region h="1024" id="R0-0-0" levels="0" w="1024" x="512" y="512">
        <resource h="1024" id="0-0-0" params="im=bicubic" sensitive="false"
        src="0\0\0.png" type="img" w="1024" x="512" y="512" z-index="0" />
    </region>
    <region h="1024" id="R0-0-1" levels="0" w="1024" x="512" y="1536">
        <resource h="1024" id="0-0-1" params="im=bicubic" sensitive="false"
        src="0\0\1.png" type="img" w="1024" x="512" y="1536" z-index="0" />
    </region>
    <region h="1024" id="R0-0-2" levels="0" w="1024" x="512" y="2560">
        <resource h="1024" id="0-0-2" params="im=bicubic" sensitive="false"
        src="0\0\2.png" type="img" w="1024" x="512" y="2560" z-index="0" />
    </region>
    ...
    <region h="731" id="R1-0-0" levels="1" w="731" x="365" y="365">
        <resource h="731" id="1-0-0" params="im=bicubic" sensitive="false"
        src="1\0\0.png" type="img" w="731" x="365" y="365" z-index="3" />
    </region>
    ...
</scene>
```

Figure 127. Extrait du fichier de configuration scene.xml pour une pyramide à cinq niveaux.

Les niveaux sont définis en premier lieu, par un indice *depth* indiquant leur ordre dans la pyramide et deux propriétés *floor* et *ceiling* définissant le « plancher » et le « plafond » de leur plage d'altitudes. Puis pour chaque niveau, on va définir les coordonnées et le chemin du fichier image correspondant à chacune de ses tuiles. Pour cela, on définit un conteneur *Région* par un identifiant unique, une taille et un centroïde. Lorsque l'utilisateur se déplace dans l'interface de navigation, une requête est effectuée sur ces régions pour identifier celles en intersection avec l'emprise vue par la caméra et devant être affichées. Enfin, chaque tuile est définie comme une *Resource*, notamment par :

- un identifiant unique,
- une taille et les coordonnées de son centroïde pour les positionner dans l'espace virtuel,
- un type de format et le chemin relatif vers le fichier source,
- un paramètre définissant le type d'interpolation utilisé pour calculer les échelles intermédiaires en zoom continu, ici bi-cubique, qui nous a paru le plus efficace visuellement.

Dans cette partie, nous avons présenté les processus de production de notre **matériel de test**. Nous avons ainsi choisi d'étudier la **transition de représentation du bâti** entre les cartes Scan Express définies au 1 : 25k et au 1 : 100k, qui utilisent respectivement le niveau d'abstraction **du bâti individuel et de l'aire urbaine**. Nous avons proposé **trois représentations intermédiaires** pour les thèmes géographiques autres que le bâti, en simplifiant les données initiales et leur symbolisation. Puis, nous avons proposé quatre transitions de représentation alternatives pour le thème du bâti, produites par des processus de généralisation différents : **typification, AGENT/CartACom, agrégation et variante avec préservation des repères visuels**. Nous avons également présenté les méthodes automatiques utilisées pour produire nos **pyramides raster tuilées** à partir des résultats de ces processus de généralisation. Pour visualiser ces pyramides et mener notre expérience, nous utilisons le **système de visualisation multi-échelle ZVTM et son API ZUIST**. Développé par des chercheurs en IHM, ce système a l'avantage de proposer des outils pour la création et le contrôle d'une **interface de test utilisateurs**. Il nous sera donc particulièrement utile pour mener à bien notre expérience, que nous présentons dans le chapitre suivant.

Chapitre E
Test utilisateurs

Pour vérifier les hypothèses C1/C2/C3 énoncées au Chapitre C et évaluer la fluidité de navigation dans les pyramides créées au Chapitre D, nous réalisons maintenant un test utilisateurs. Pour cela, après avoir rappelé les objectifs de cette expérience, nous nous appuyons sur la littérature en cartographie, en sciences cognitives et en IHM (§E.1) pour définir la tâche cartographique multi-échelle que nous utilisons (§E.2). Puis nous dressons le plan d'expérience en expliquant comment nous avons configuré (§E.3) puis implémenté ce test (§E.4). Enfin, nous analysons et interprétons ses résultats, puis faisons un retour sur la conduite de tests utilisateurs contrôlés en cartographie (§E.5).

E.1. Objectifs du Test et Analyse des Travaux Existants

Après avoir rappelé les **objectifs de notre test utilisateurs** dans la partie §E.1.1, nous dressons un état de l'art des pratiques issues de la littérature en **cartographie, en sciences cognitives et en IHM** et étudions ainsi le **potentiel des travaux existants** pour notre cas d'étude, en étudiant respectivement les méthodes d'évaluation et protocoles de test proposés dans les parties §E.1.2 et §E.1.3. Précisons que l'ensemble de cette étude a été menée en collaboration avec Emmanuel Pietriga, et plus ponctuellement ses collègues de l'équipe ILDA (INRIA), qui regroupe des chercheurs en IHM coutumiers de la réalisation de tests utilisateurs contrôlés et que nous tenons à remercier.

E.1.1. Rappel des Objectifs de notre Test Utilisateurs

Dans le Chapitre C, nous avons formulé des propositions d'amélioration des cartes multi-échelles existantes, basée sur l'ajout de représentations intermédiaires. Afin de formaliser les règles de bonne construction de ces représentations intermédiaires, nous avons formulé en particulier les Hypothèses C1/2/3 concernant **l'influence de leurs variables de construction sur la fluidité de navigation dans la pyramide**, que nous rappelons ici.

Hypothèse C1. À nombre de représentations intermédiaires et intervalles d'affichage constants, **utiliser des représentations mixtes** a une influence positive sur la fluidité de navigation.

Hypothèse C2. À nombre de représentations intermédiaires et intervalles d'affichage constants, la **progressivité de simplification du contenu cartographique au fil des échelles** a une influence positive sur la fluidité de navigation.

Hypothèse C3. À nombre de représentations intermédiaires et intervalles d'affichage constants, **conserver une représentation fidèle des repères visuels** a une influence positive sur la fluidité de navigation.

Pour valider ces hypothèses, nous devons **observer l'évolution de la fluidité de navigation en fonction de ces facteurs** que sont l'utilisation de représentations mixtes, la progressivité de simplification du contenu cartographique au fil des échelles et la conservation d'une représentation fidèle des repères visuels. A cette fin, nous avons produit les quatre pyramides présentées dans le Chapitre D, chacune étant construite avec une transition de représentation différente pour le thème du bâti, en faisant varier en particulier nos facteurs hypothétiques. **Comparer la fluidité de navigation dans ces différentes pyramides** nous permettra donc théoriquement de vérifier l'influence de ces facteurs et la validité de nos hypothèses. Comparer la fluidité de navigation **entre ces transitions alternatives** d'une part **et la pyramide initiale** d'autre part pourra aussi nous permettre de vérifier l'amélioration apportée par nos propositions en général, concernant l'ajout de représentations intermédiaires. Pour vérifier nos hypothèses, il nous faut donc maintenant **évaluer la fluidité de navigation dans chacune de ces pyramides**. Pour rappel, nous définissons la navigation dans une carte multi-échelle comme fluide si l'utilisateur peut y réaliser une tâche de manière efficace, c'est-à-dire précisément, rapidement et facilement. Nous évaluons donc la fluidité de navigation en mesurant les performances de l'utilisateur lors de la réalisation d'une tâche cartographique multi-échelle dans les différentes pyramides testées. Il nous faut donc maintenant **définir une tâche et un protocole de test permettant de mener cette évaluation**. Pour cela, nous présentons dans la partie suivante des méthodes d'évaluation existantes et leur intérêt pour notre cas d'étude en particulier.

E.1.2. Intérêt Potentiel des Méthodes d'Évaluation Existantes

En parcourant la littérature, nous avons constaté **qu'il n'existe pas, à notre connaissance, de tests utilisateurs visant à évaluer la fluidité de navigation dans une carte multi-échelle**. Pour mettre en place notre propre test, nous nous inspirons donc plus largement des travaux mentionnés dans la littérature en cartographie, en sciences cognitives et en IHM, **impliquant des représentations cartographiques et/ou des interfaces de navigation multi-échelle**. Nous montrons ici les limites des méthodes existantes pour estimer la fluidité de navigation dans une carte multi-échelle. Les observations et les exemples présentés dans ce paragraphe sont tirés d'une **analyse de 20 articles scientifiques présentant des tests utilisateurs**, dont le détail est fourni en Annexe H.

Pour évaluer l'efficacité d'un procédé de représentation ou d'une légende en général, les cartographes utilisent traditionnellement une **évaluation subjective** [Martin 2008 ; Davies et al., 2010]. On y demande aux utilisateurs de juger les produits testés, selon des critères comme leur complexité visuelle ou plus globalement leur préférence d'utilisation pour une tâche donnée. Concrètement, ce type d'évaluation prend souvent la forme d'une série d'affirmations sur différents aspects du produit testé, avec lesquelles l'utilisateur doit exprimer son degré d'accord via une échelle de Likert. Initialement proposée par [Davies 1989], cette échelle propose une suite de chiffres (couramment 5, 7 ou 9 échelons) correspondant à des degrés d'accord ou de désaccord. Des travaux évaluent ainsi les préférences d'utilisation d'un produit pour une tâche donnée [Cook et Ruddle, 2014 ; Lokka et Çöltekin, 2017] ou la complexité d'une représentation cartographique [Schnur et al., 2017]. Les évaluations subjectives permettent donc à l'utilisateur **d'exprimer son ressenti personnel**. Elles peuvent être intéressantes dans notre cas d'étude, pour **estimer les difficultés perçues par l'utilisateur** dans une tâche de navigation multi-échelle. Cependant, la fluidité de navigation est une notion assez complexe à définir : il n'est donc pas garanti que les différents participants jugent les mêmes aspects de la carte multi-échelle. De plus, c'est une notion potentiellement subjective : l'utilisateur estime la fluidité en fonction de son expérience, relativement à ce qu'il connait. Son jugement peut donc varier au cours du temps et plus particulièrement au cours de l'expérience.

On peut également mener un test d'évaluation basé sur une **mesure de performances, moins dépendant du jugement de l'utilisateur**. Expliqué simplement, on demandera alors à un groupe de **participants** de réaliser une ou plusieurs **tâches,** actions élémentaires ou exercices plus complexes impliquant les mécanismes cognitifs et/ou les **produits** que l'on souhaite étudier. Pour évaluer le comportement utilisateur, on peut alors utiliser des méthodes quantitatives, par exemple **le temps ou la précision de réussite de la tâche** [Kinkeldey et al., 2014]. On peut également enregistrer une vidéo de ses mouvements et de ses interactions avec l'interface, ou une trace audio de son processus de réflexion émis à haute voix (***think aloud***) [van Elzakker 2004, pp. 36-41] ; ou bien encore utiliser des mesures biologiques, comme ses mouvements oculaires (***eye-traking***) [Çöltekin et al., 2009 ; Kiefer et al., 2017], la taille de ses pupilles [Kiefer et al., 2016], son rythme cardiaque ou la conductivité de sa peau, qui trahissent l'émotion [Fabrikant et al., 2012] ou le stress [Frei et al., 2016]. En particulier, des travaux récents proposent d'étudier la variation du diamètre de la pupille de l'utilisateur pour évaluer la charge cognitive relative à la tâche demandée sur une carte statique [Kiefer et al., 2016]. Néanmoins, la faisabilité et la pertinence d'évaluer cette métrique avec un stimulus cartographique multi-échelle n'ont pas encore été démontrées. De plus, elle demande une installation spécifique, qui impose souvent une position immobile peu naturelle à l'utilisateur.

Nous sommes convaincus de l'intérêt potentiel de ces évaluations subjectives et biologiques, pour

mieux comprendre le mécanisme cognitif impliqué dans la navigation multi-échelle. Pour évaluer la fluidité de navigation et comparer l'efficacité de nos pyramides en revanche, il nous semble plus pertinent de **baser notre test utilisateurs sur une mesure de performances**, plus objective.

E.1.3. Intérêt Potentiel des Protocoles de Test Existants

Que ce soit en cartographie, où nous avons identifié relativement peu de tests basés sur la mesure de performances, ou bien en sciences cognitives où ce type d'évaluation est plus coutumier, nous **n'avons pas trouvé de protocoles utilisant de carte multi-échelle**. En cartographie, les efforts de recherche portent généralement sur l'efficacité des différents procédés de représentation à **échelle constante**. Ces travaux reposent principalement sur des tâches où l'utilisateur doit répondre à des questions d'analyse spatiale en interprétant le contenu de la carte [Luz et Masoodian, 2014 ; Rautenbach et al., 2016], ou encore sur des tâches de localisation d'un objet spécifique dans la carte [Brychtova et Çöltekin, 2014 ; Rosenholtz et al., 2007]. En sciences cognitives cette fois, les tests utilisateurs sont souvent utilisés pour mieux connaitre un mécanisme cognitif, comme la mémorisation d'un itinéraire [Çöltekin et al., 2017 ; Lokka et Çöltekin, 2017]. Les tâches utilisées reposent alors sur des supports visuels statiques à **emprise et échelle constantes** ou sur des séquences filmées de navigation dans un environnement virtuel [Lokka et Çöltekin, 2017]. Cette limitation peut s'expliquer par la volonté de limiter les biais potentiels et par l'utilisation fréquente de capteurs physiques qui demandent une calibration précise, comme les méthodes d'eye-tracking [Kiefer et al., 2017]. Si l'on résume, les tâches relevées dans les travaux étudiés en cartographie et sciences cognitives peuvent donc être réalisées à même échelle, **sans opération de zoom.** Ces tâches spécifiques **ne conviennent donc pas** à notre cas d'étude, puisque nous souhaitons évaluer la fluidité de cette navigation multi-échelle en particulier.

A l'inverse, de nombreux travaux en IHM visent à **évaluer l'efficacité de différentes interfaces ou méthodes d'interactions multi-échelle** [Hornbaek et al., 2002 ; Plumlee et Ware, 2006 ; Pietriga et al., 2007 ; Shupp et al., 2009 ; Jakobsen et Hornbaek, 2011 ; Javed et al., 2012 ; Wong et al., 2015]. Bien qu'ils visent globalement à faciliter la navigation dans des données cartographiques, **seuls quelques-uns reposent sur une carte multi-échelle** [Hornbaek et al., 2002 ; Javed et al., 2012 ; Wong et al., 2015]. Les autres considèrent plutôt une représentation cartographique constante quelle que soit l'échelle [Shupp et al., 2009 ; Wilson et al., 2010 ; Jakobsen et Hornbaek, 2011], voire un ensemble très limité de variables visuelles élémentaires comme illustré par la Figure 128, pour minimiser les biais potentiels [Plumlee et Ware, 2006 ; Pietriga et al., 2007].

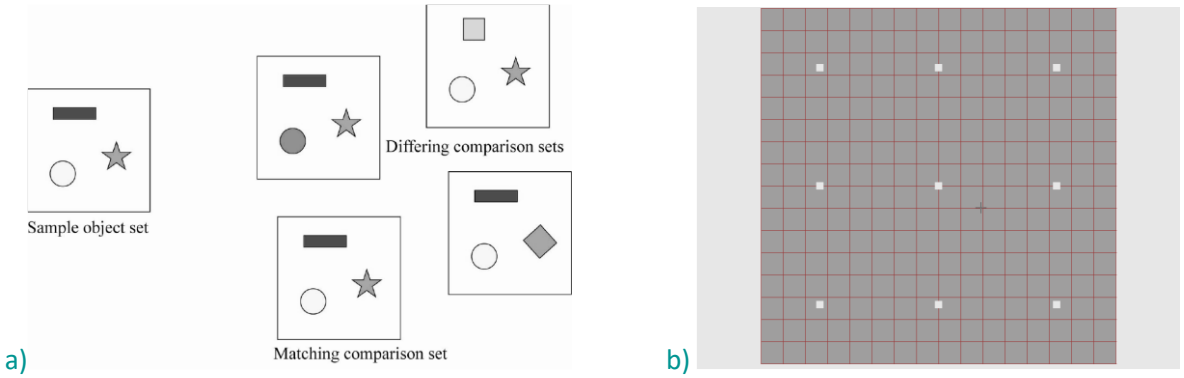


Figure 128. Représentations graphiques basées sur des variables visuelles élémentaires, utilisées en IHM dans les travaux de (a) [Plumlee et Ware, 2006] et (b) [Pietriga et al., 2007].

Tous les travaux que nous avons étudiés utilisent pour leur tâche des cibles artificielles ajoutées pour l'exercice, plutôt que des objets de la carte elle-même, lorsqu'une représentation cartographique est présente. Deux travaux utilisent ainsi une même tâche avec [Javed et al., 2012] et sans représentation cartographique [Plumlee et Ware, 2006]. D'une manière générale en IHM, **la représentation cartographique sert donc uniquement de support visuel et n'est pas évaluée par la tâche, qui peut aussi bien être réalisée sans recours au contenu cartographique**. Puisque c'est cette représentation cartographique que nous cherchons à évaluer dans notre cas, ces tâches ne conviennent pas non plus en l'état.

Néanmoins, notre analyse de ces travaux en cartographie, sciences cognitives et IHM nous a permis d'identifier certaines **bonnes pratiques pour la mise en place de tests utilisateurs contrôlés**. Pour limiter les variables impliquées dans l'expérience, les conditions de réalisation des tests contrôlés sont constantes entre les différents participants. Dans notre cas, nous devrons donc réaliser toutes les sessions du test **dans un même environnement** (salle, table, chaise, condition de luminosité et nuisance sonore) et **avec un même équipement informatique** (écran, clavier, souris, distance à l'écran). De plus, les travaux en IHM conseillent de simplifier au maximum le stimulus utilisé, en utilisant des représentations élémentaires, pour **limiter les biais potentiels**. Dans notre cas, produire notre propre matériel de test nous garantit l'absence de facteur variable entre les pyramides, excepté la transition du bâti dont nous souhaitons mesurer l'influence.

Par ailleurs, la grande majorité des travaux étudiés mentionnent un **biais potentiel dû à l'ordre des conditions testées**. Les performances de l'utilisateur peuvent en effet s'améliorer au cours du test, par un effet d'apprentissage [Baenninger et Newcombe, 1989], ou au contraire se dégrader à cause de la fatigue que peut ressentir l'utilisateur. Une différence de performances entre deux pyramides, respectivement testées au début et à la fin du test, pourrait donc ne pas être due à l'influence de la pyramide elle-même mais simplement à l'ordre du test. Pour éviter cela, les travaux existants proposent plusieurs méthodes. D'une part, ajouter une **phase d'entrainement** en début de test permet de limiter l'effet d'apprentissage. D'autre part, **mélanger l'ordre de test entre les différents participants** permet de contrebalancer statistiquement ce biais potentiel [Çöltekin 2015]. Pour améliorer la significativité des résultats, il est également possible de **multiplier les essais sur une même condition**. Dans notre cas, chaque participant réalisera donc la tâche choisie plusieurs fois sur une même pyramide, selon un ordre différent des autres participants.

Enfin en ce qui concerne les mesures proposées dans les travaux étudiés, les **mesures de précision et de temps** sont couramment utilisées pour évaluer les performances de l'utilisateur lors de la réalisation d'une tâche en géovisualisation [Kinkeldey et al., 2014]. Néanmoins, des travaux en sciences cognitives [Fabrikant et al., 2008 ; Çöltekin et al., 2010] conseillent de coupler ces mesures à des **méthodes qualitatives**, comme le *think aloud* ou l'enregistrement des interactions, pour pouvoir mieux comprendre et expliquer ces résultats numériques.

Aucun protocole n'existe pour évaluer la fluidité de navigation dans une carte multi-échelle. Nous définirons donc dans les parties suivantes la **tâche** (§E.2), le **protocole** (§E.3) et **l'implémentation** (§E.4) de notre test de manière relativement empirique. Puis nous **analyserons et interpréterons ses résultats** et faisons un retour d'expérience sur la conduite de test utilisateurs pour l'évaluation de cartes multi-échelles en général (§E.5).

E.2. Tâche Cartographique Multi-Échelle

La tâche, c'est-à-dire le type d'action ou d'effort demandé à l'utilisateur, doit être déterminée **en fonction du mécanisme cognitif étudié** [Anderson et Krathwohl, 2001], pour que les performances de l'utilisateur soient représentatives d'une situation réelle. Bien choisir la ou les tâches demandées dans un test utilisateurs est donc un facteur primordial de la pertinence de notre test utilisateurs. Dans notre cas, nous étudions la navigation multi-échelle, **mécanisme complexe et relativement méconnu**. Plusieurs types de mécanismes élémentaires interviennent vraisemblablement dans une tâche de navigation multi-échelle : la lecture de chaque carte à une échelle donnée, la compréhension des relations entre deux cartes à différentes échelles et la mémorisation d'une représentation donnée pour retrouver ses repères lors d'une opération de zoom. **Nous devrons donc trouver une tâche dont le principe représente bien les différentes difficultés de la navigation multi-échelle.**

Par ailleurs, chaque tâche peut impliquer une charge cognitive différente [Anderson et Krathwohl, 2001], selon l'effort qu'elle demande à l'utilisateur. Comparer les performances de l'utilisateur entre des tâches différentes ne serait donc pas pertinent. Dans notre cas, pour limiter la durée du test et éviter un effet de fatigue, **nous n'utiliserons qu'une seule tâche dans notre test utilisateurs**. Néanmoins, pour que les capacités de mémorisation de l'utilisateur ne biaisent pas notre expérience, nous devrons utiliser des occurrences différentes de cette tâche au fil du test. Par exemple, si nous utilisons une tâche basée sur le suivi d'un itinéraire, l'utilisateur devra retrouver un itinéraire différent à chaque essai. Pour ne pas introduire de biais dans notre expérience, ces différentes occurrences devront présenter une difficulté similaire. **Nous devrons donc trouver une tâche dont l'implémentation est suffisamment reproductible pour créer autant d'occurrences que d'essais nécessaires pour notre test.**

Pour répondre à ce double objectif, nous évaluons dans la partie §E.2.1 un panel de tâches impliquant l'utilisation de représentations cartographiques et/ou l'utilisation d'interface de navigation. Nous évaluons l'intérêt potentiel et les inconvénients de chaque grand type de tâches identifié. Puis dans les parties §E.2.2 et §E.2.3, nous présentons respectivement la tâche et les mesures de réussite que nous utilisons dans notre test utilisateurs.

E.2.1. Intérêt Potentiel des Tâches Existantes

Parmi les tâches utilisées dans les travaux que nous avons étudiés, dont les caractéristiques sont détaillées en Annexe H, nous distinguons globalement les **six types de tâches** suivants :

- (1) sélectionner un objet visible et mis en évidence ;
- (2) trouver un ou plusieurs objets clairement décrits ;
- (3) comparer plusieurs objets distants dont la localisation est mise en évidence ;
- (4) identifier les différences entre deux représentations cartographiques ;
- (5) lire et interpréter la carte ou des éléments de l'interface ;
- (6) mémoriser et/ou suivre un itinéraire donné.

Les tâches de type (1) demandent à l'utilisateur de **sélectionner une cible visible**. Dans [Jakobsen et Hornbaek, 2011], on demande ainsi à l'utilisateur de zoomer sur une cible et de la sélectionner lorsque c'est possible, c'est-à-dire à partir d'une certaine échelle. Cette tâche multi-échelle ne demande qu'une opération de zoom pour être réalisée, sans tenir compte de la représentation cartographique sous-jacente. Cela s'explique par le but du test, qui vise à comparer l'efficacité de

différentes méthodes d'interactions (*pan+zoom, overview+detail, focus+context*) en fonction de la taille d'écran. Néanmoins, puisque la cible est visible à toutes les échelles comme le montre la Figure 129, **il suffit à l'utilisateur de la pointer avec le curseur pour zoomer dessus, sans aucun mécanisme de lecture cartographique**. Ce type de tâche nous semble donc contre-indiqué dans notre cas d'étude.

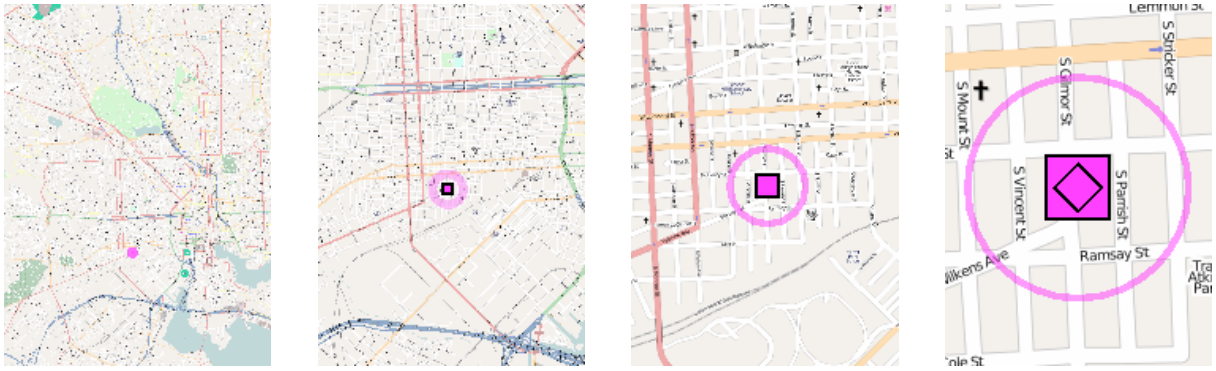


Figure 129. Illustration extraite de [Jakobsen et Hornbaek, 2011] : la tâche *Navigate* consiste à zoomer sur la cible mise en évidence (première image) jusqu'à ce que le losange apparaisse (dernière image) pour la sélectionner en cliquant dessus.

Les tâches de type (2) demandent cette fois à l'utilisateur de **trouver un ou plusieurs objets clairement décrits** (attribut ou symbolisation spécifique) en les cherchant dans la carte. Nous distinguons ici deux variantes de ce type de tâche. La première consiste à rechercher un objet en particulier dans une carte statique [Rosenholtz et al., 2007 ; Shupp et al., 2009 ; Brychtova et Çöltekin, 2014] ou multi-échelle [Hornbaek et al., 2002]. La seconde variante demande plutôt une fouille systématique de la carte pour trouver l'ensemble des objets correspondants aux critères recherchés [Ruddle et al., 2015 ; Wong et al., 2015]. **Dans quelques travaux seulement, une utilisation de représentations à différentes échelles est utile pour accomplir la tâche**. Dans [Hornbaek et al., 2002] en particulier, pour simplifier la tâche on précise l'unité administrative dans lequel la cible se trouve : l'utilisateur repère donc cette zone à petite échelle puis zoome et cherche la cible seulement visible à plus grande échelle. Dans [Wong et al., 2015], les cibles à trouver sont visibles quelle que soit l'échelle, mais ne peuvent être sélectionnées qu'à certains niveaux de zoom, comme illustré dans la Figure 130. Cette expérience vise à évaluer l'efficacité de visualiser les zones géographiques déjà visitées dans une application de saisie collaborative. Ce dernier exemple est sans doute le seul que nous ayons trouvé qui **exploite particulièrement les échelles intermédiaires**. L'utilisateur doit ainsi identifier à petite échelle les zones à visiter, puis zoomer progressivement sur un point pour trouver le niveau de zoom où sa sélection est possible. De plus, les cibles sont systématiquement positionnées le long du littoral : l'utilisateur peut donc **s'aider du fond cartographique pour trouver les cibles plus facilement et réaliser la tâche plus rapidement**. Bien que l'on puisse supposer ici que la complexité visuelle de la carte influence la réussite de cette tâche, l'utilisateur n'est pas obligé de se servir du fond cartographique pour réaliser la tâche. Nous ne serions donc pas assurés que ses performances reflètent la fluidité de navigation elle-même. Pour les utiliser dans notre cas d'étude, il faudrait donc adapter ces tâches, pour que l'utilisateur doive se servir du contenu cartographique d'une part, et des relations entre les représentations à différentes échelles d'autre part. On pourrait par exemple remplacer les cibles artificielles par des objets cartographiques, visibles uniquement à certaines échelles.

Figure 130. Illustration extraite de [Wong et al., 2015] : cette tâche consiste à zoomer sur les cibles mises en évidence (marqueurs rouge sur l'image de gauche) jusqu'à ce qu'il soit possible de les sélectionner (quand elles passent en jaune). Une fois sélectionnées, elles sont représentées en vert quelle que soit l'échelle.

Les tâches de type (3) demandent à l'utilisateur de **comparer plusieurs objets distants.** Dans ces tâches, la localisation des différentes cibles est toujours visible, représentée à petite échelle sous forme simplifiée ou plus grossièrement par un carré de position, comme l'illustre la Figure 131. En revanche, les cibles elles-mêmes n'apparaissent en détail que si l'on zoome suffisamment dessus. Le principe est donc de **visiter successivement les différentes cibles et de comparer leur représentation détaillée**. Plusieurs variantes de cette tâche sont utilisées, par exemple sélectionner la cible qui porte une marque spécifique [Pietriga et al., 2007 ; Pindat et al., 2012] ou la cible identique à une cible de référence [Plumlee et Ware, 2006 ; Javed et al., 2012]. Dans ces exemples, il est donc possible que l'utilisateur puisse accomplir la tâche sans visiter toutes les cibles. Pour éviter le **facteur chance**, [Pietriga et al., 2007] propose de faire apparaitre la bonne cible dynamiquement lorsque l'utilisateur a parcouru suffisamment de zones. Une autre variante de cette tâche demande de sélectionner la cible qui porte le plus grand chiffre [Jakobsen et Hornbaek, 2011]. Dans ce cas, toutes les cibles doivent être visitées et l'utilisateur doit également mémoriser la localisation du plus grand chiffre rencontré. Comme nous l'avons déjà mentionné, même lorsqu'une représentation cartographique est utilisée, la réussite de la tâche ne s'appuie pas ici sur son contenu. Cette tâche consiste en fait à zoomer sur un repère en plaçant le curseur dessus, puis à localiser la cible dans la représentation plus détaillée, donc à échelle constante finalement. **C'est donc une opération de navigation multi-échelle mécanique (*zoomer sur un point*) et non pas cognitive (*se repérer entre les différentes représentations intermédiaires*), qui le guide dans la bonne direction**. C'est logique, car c'est spécifiquement ces techniques d'interactions qui sont évaluées dans ces travaux. Pour adapter ces tâches à notre cas d'étude, il faudrait que leur réalisation dépende de l'utilisation du contenu cartographique. Pour cela, nous pourrions remplacer les cibles artificielles par des objets cartographiques, en indiquant leur localisation par une information spatiale de haut niveau. Par exemple, nous pourrions demander à l'utilisateur de **comparer les tailles des mairies de plusieurs villes distantes**, dont les toponymes sont visibles à petite échelle. L'utilisateur devrait donc localiser le toponyme de chaque ville sur la carte à petite échelle, puis zoomer jusqu'à distinguer les bâtiments individuels, puis localiser sa mairie et mémoriser sa taille. Néanmoins, notre zone géographique étant peu étendue (seulement six villes) et les types de données utilisés dans notre matériel de test étant peu nombreux, il nous semble difficile de produire suffisamment d'occurrences pour une tâche de ce type.

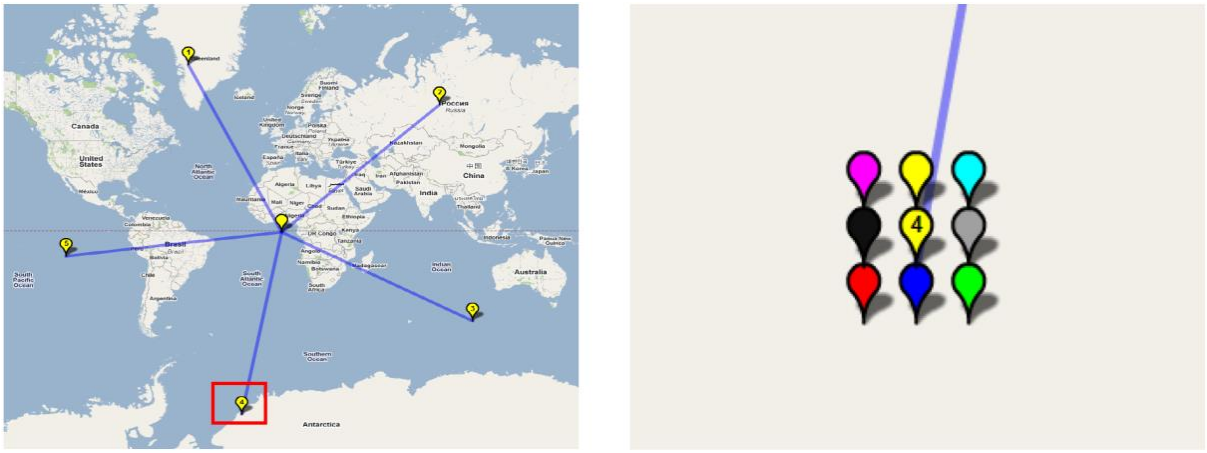


Figure 131. Illustration extraite de [Javed et al., 2012] : cette tâche consiste à identifier la cible identique à la référence (cible du milieu sur l'image de gauche), les cibles étant uniquement visibles à grande échelle (à droite) mais leur position étant indiquée sur la vue globale (à gauche).

Les tâches de type (4) demandent à l'utilisateur **d'identifier les différences entre deux représentations cartographiques**. Dans [Lobo et al., 2015], l'utilisateur doit ainsi identifier l'objet bâti ou route qui a été ajouté, supprimé ou modifié entre une carte et une image aérienne statiques, comme illustré par la Figure 132. Les deux représentations sont alors visualisées simultanément en utilisant les différentes méthodes d'interaction évaluées (loupes, sliders, transparence). Dans ces travaux, cette tâche est réalisée à **emprise et échelle constantes**. Adapter ce type de tâches à une utilisation multi-échelle ne nous semble pas pertinent dans notre cas, car de fait avec la généralisation, **les données ne sont pas les mêmes et de nombreux changements apparaissent entre les cartes à différentes échelles.** Il serait donc très difficile pour l'utilisateur de distinguer la modification recherchée d'un changement dû à la généralisation.

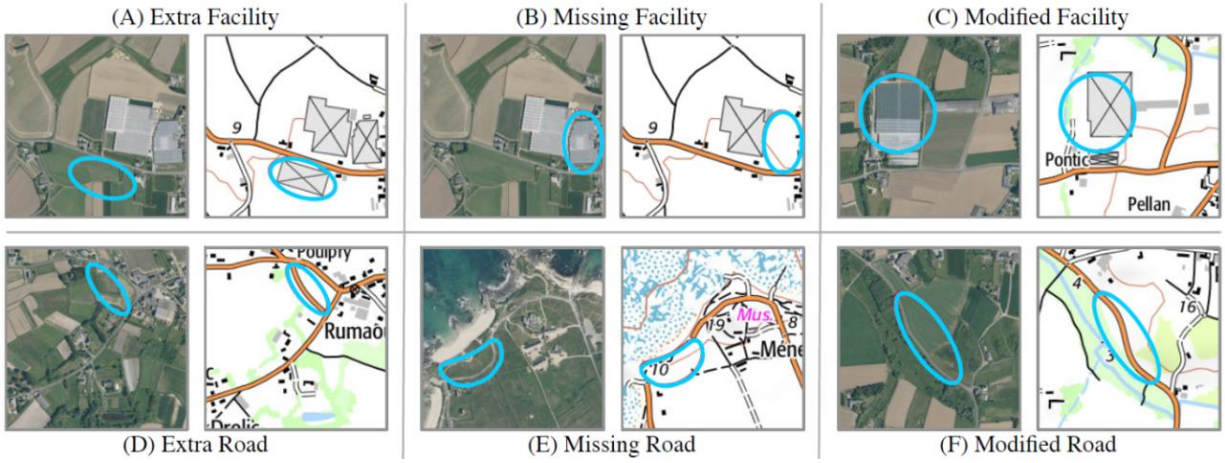


Figure 132. Illustration extraite de [Lobo et al., 2015] : cette tâche consiste à identifier un ajout (A et D), une suppression (B et E) ou une modification (C et F) d'un bâtiment ou d'une route, entre une orthophoto et une carte topographique.

Les tâches de type (5) demandent à l'utilisateur de **lire et interpréter un carte** [Luz et Masoodian, 2014 ; Rautenbach et al., 2016] ou encore des éléments spécifiques d'une interface cartographique, comme des flèches de direction [Burigat et Chittaro, 2011]. Elles sont généralement présentées sous forme de questions simples demandant à l'utilisateur d'interroger une carte statique et sa légende.

Elles prennent également la forme d'un problème d'analyse spatiale plus complexe dans [Wilson et al., 2010], dans des environnements de type SIG où l'utilisateur peut changer l'échelle d'affichage et la symbolisation des couches de données. Par exemple, les auteurs utilisent la question suivante (traduite ici) : « Où est la station *Marley Street* ? A quelle distance est-elle de la station *Central Subway* ? ». Ce type de tâches pourrait être adapté pour une utilisation des représentations à différentes échelles, si elles portaient à la fois sur des objets élémentaires discernables à grande échelle et sur des structures spatialement étendues, visibles uniquement à petite échelle. Par exemple dans notre cas : « *Combien y a-t-il de bâtiments publics dans la plus petite ville de la zone ?* ». Comme l'ensemble des bâtiments publics est uniquement visible à grande échelle et que comparer la taille des différentes villes est plus pertinent sur une vue globale, **cette tâche demanderait à l'utilisateur d'utiliser les représentations à différentes échelles**. Il se servirait aussi des représentations intermédiaires pour se repérer dans sa navigation puisqu'aucun repère artificiel n'est ajouté sur la carte pour le guider. Néanmoins, comme pour les tâches de type (3), la configuration de notre matériel de test ne nous semble pas adaptée pour produire suffisamment d'occurrences pour une tâche de ce type.

Les tâches de type (6) demandent à l'utilisateur **de mémoriser et/ou de suivre un itinéraire donné**. Dans [Çöltekin et al., 2017], l'utilisateur doit mémoriser une séquence animée montrant le tracé d'un itinéraire sur une carte statique, puis reconnaitre ou relever une différence avec un autre itinéraire. Dans [Lokka et Çöltekin, 2017] cette fois, c'est une séquence filmée qui montre l'itinéraire à mémoriser dans un environnement virtuel en 3D. L'utilisateur doit ensuite reconnaitre des passages donnés ou indiquer le nombre de changements de direction que prend l'itinéraire. Ici, **l'idée de reconnaitre tout ou partie d'un itinéraire entre deux représentations est particulièrement intéressante pour nous**. A échelle constante, mémoriser et retrouver un itinéraire donné demande de s'appuyer sur le contexte géographique, pour prendre des repères. C'est encore plus vrai entre deux cartes à différentes échelles, puisqu'une partie de l'itinéraire est susceptible d'être simplifiée voire éliminée par la généralisation. Retrouver un itinéraire à une autre échelle présente donc une difficulté relative : la densité et la géométrie du réseau routier changent beaucoup, mais sa topologie et son organisation générale sont conservées. Par ailleurs en IHM, [Shupp et al., 2009 ; Jakobsen et Hornbaek, 2011] proposent une tâche incluant une navigation cartographique. L'utilisateur doit ici suivre à l'écran un itinéraire donné et sélectionner toutes les intersections parcourues. Par définition, il doit donc s'appuyer sur le contexte géographique de l'itinéraire pour réussir la tâche. En combinant ces deux idées, nous pouvons donc demander à l'utilisateur de **sélectionner les intersections parcourues par un itinéraire à une certaine échelle, qu'on représenterait uniquement à une autre échelle**.

Précisons ici que cette analyse n'est bien sûr pas exhaustive, car nous n'avons étudié que quelques dizaines de travaux existants. Néanmoins, parmi les travaux étudiés, aucune tâche ne peut convenir en l'état à notre cas d'étude. Néanmoins, il nous semble possible d'adapter les tâches existantes des types (2), (3), (5) et (6) en une tâche cartographique multi-échelle. Comme déjà mentionné, les tâches de type (3) et (5) ne nous semblent pas suffisamment reproductibles avec notre matériel de test. Par ailleurs, il nous semble que les tâches de type (6), basées sur le suivi d'un itinéraire, permettent mieux d'évaluer l'utilisation des transitions de représentation, puisqu'elles demandent de comparer deux représentations à différentes échelles ; que les tâches de type (2), quant à elles basées sur la localisation de cibles par une fouille de la pyramide. **Nous choisissons donc d'utiliser dans notre test utilisateurs une tâche basée sur le suivi d'un itinéraire**.

E.2.2. Tâche Cartographique Multi-Échelle

Dans ce paragraphe, nous détaillons l'adaptation de la tâche utilisée par [Shupp et al., 2009 ; Jakobsen et Hornbaek, 2011] en une **tâche visant à évaluer la fluidité de navigation dans une carte multi-échelle.**

En guise de tâche, nous demanderons donc à l'utilisateur de retrouver un **itinéraire-cible** sur une carte détaillée, d'après un **itinéraire-source** donné à plus petite échelle, en naviguant entre les représentations. Les points de départ et d'arrivée de l'itinéraire sont matérialisés par des repères respectivement vert et rouge, visibles quelle que soit l'échelle comme le montre la Figure 133.

Figure 133. Les points de départ et d'arrivée de l'itinéraire sont représentés par des points respectivement vert et rouge, visibles tout au long de l'essai, quelle que soit l'échelle. NB : la complexité (longueur, sinuosité) de cet exemple d'itinéraire n'est pas représentative des itinéraires utilisés dans le test.

Lorsque la tâche démarre, la carte est affichée centrée sur le point de départ, au niveau de zoom maximum, c'est-à-dire à l'échelle d'affichage 1 : 10k. Pour localiser le point d'arrivée, l'utilisateur doit alors dézoomer pour prendre du recul. Pour que l'utilisateur doive naviguer dans la pyramide et s'appuyer sur les représentations intermédiaires pour accomplir la tâche, l'affichage de l'itinéraire-source n'est disponible **qu'en-deçà d'une certaine échelle**. Lors de la mise en place du test, des utilisateurs témoins nous ont fait part d'une gêne relative à ce paramètre. Lorsque l'emprise de l'itinéraire est visible dans son ensemble, il leur semblait illogique de devoir encore dézoomer pour afficher l'itinéraire-source. Nous avons donc choisi de permettre **l'affichage de l'itinéraire-source à partir de l'échelle d'affichage du 1 : 25k**.

De plus, l'affichage de l'itinéraire-source n'est disponible qu'en pointant un bouton **à l'extérieur de la fenêtre de navigation** avec le curseur de la souris, comme le montre la Figure 134. Cette méthode d'interaction nous permet d'éviter les problèmes évoqués avec les tâches de type (3), c'est-à-dire que l'utilisateur puisse faire une succession d'opérations de zoom centrées sur chaque intersection pour accomplir la tâche, à l'aide du curseur de la souris, sans utilisation du support cartographique. Pour que cette tâche repose avant tout sur l'utilisation de la carte et non pas sur la mémorisation de l'itinéraire, l'itinéraire-source peut être affiché autant de fois et aussi longtemps que nécessaire au cours de l'essai.

En termes de symbolisation, nous avons choisi de représenter l'itinéraire-source en **violet**, couleur peu présente dans la carte et donc facilement discernable. Le niveau de transparence et la largeur de symbole choisis permettent à l'utilisateur de distinguer le contenu cartographique sous-jacent et

donc de **prendre ses repères en s'appuyant sur les caractéristiques visuelles des routes et de leur voisinage**. Cette symbolisation relativement floue permet aussi de limiter les incohérences entre la géométrie détaillée de l'itinéraire-source, définie à grande échelle, et le réseau routier simplifié sous-jacent. Ici, conserver une géométrie détaillée permet néanmoins de distinguer la présence et la forme des tronçons de l'itinéraire qui ont été éliminés par la généralisation, comme le montre le tronçon entouré sur la Figure 134.

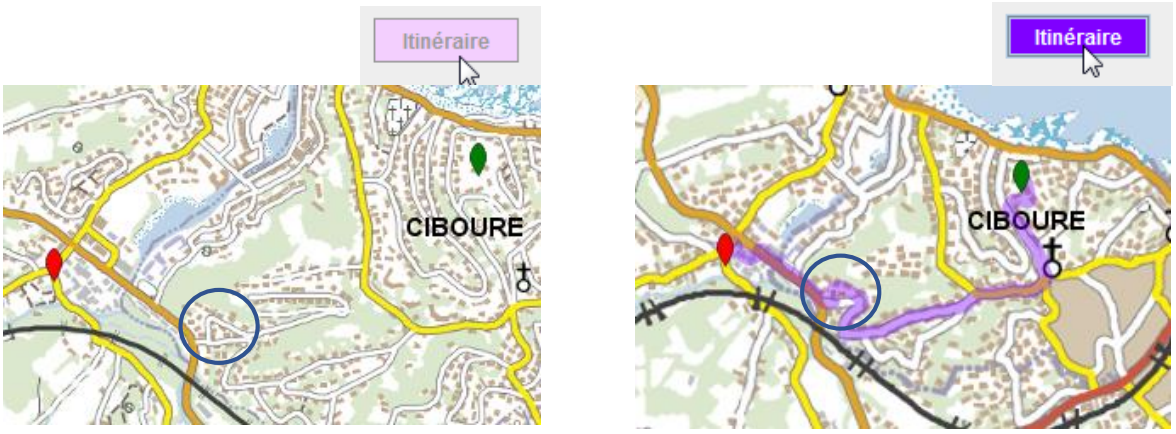


Figure 134. Le bouton *Itinéraire* change de couleur en-deçà d'une certaine échelle (à droite) pour indiquer que l'itinéraire-source est disponible. Pour l'afficher, l'utilisateur doit passer le pointeur sur ce bouton, situé à l'extérieur de la fenêtre de navigation. Par ailleurs, le niveau de transparence de l'itinéraire permet à la fois de distinguer le réseau routier sous-jacent et la forme des tronçons éliminés par la généralisation, comme le virage ici entouré en bleu.

Pour réaliser la tâche demandée, l'utilisateur doit donc afficher l'itinéraire à petite échelle, en mémoriser une partie, puis zoomer **pour aller retrouver l'itinéraire-cible** sur la carte la plus détaillée. Pour contrôler le suivi de l'itinéraire, [Shupp et al., 2009 ; Jakobsen et Hornbaek, 2011] proposent de sélectionner les croisements, lorsqu'une route passe en dessous ou au-dessus de l'itinéraire. N'ayant pas assez de ponts routiers sur notre zone d'étude, nous choisissons d'utiliser plutôt les intersections du réseau routier. Cependant, cliquer sur toutes ces intersections peut être long et pénible sur une distance conséquente. Nous avons donc présélectionné un jeu de points sur l'ensemble du réseau routier de la zone, appelés **marqueurs,** identiques pour tous les essais du test. Chaque itinéraire croise un certain nombre de marqueurs, appelés **points-cibles**, que l'utilisateur devra sélectionner pour réaliser la tâche. Les autres marqueurs, visuellement identiques aux points-cibles, servent alors de **distracteurs**. Comme le montre la Figure 135, les marqueurs sont matérialisés par des points uniquement visibles au niveau de zoom maximal et répartis de façon irrégulière pour que l'utilisateur ne puisse pas les trouver juste logiquement. Leur symbolisation a été choisie pour qu'ils soient discernables sans équivoque, en masquant un minimum le fond cartographique, pour permettre à l'utilisateur de s'appuyer sur ses éventuels repères visuels. L'utilisateur devra ainsi **sélectionner tous les points-cibles, dans l'ordre du point de départ au point d'arrivée**. Pour éviter les erreurs dues à des saisies trop imprécises, la sensibilité des points est calibrée pour qu'un clic relativement distant soit pris en compte.

Pour aider l'utilisateur à juger s'il est sur la bonne voie lorsqu'il clique sur un point, nous avons mis en place des **rétroactions** illustrées par la Figure 136 :

- si le point cliqué est bien le point-cible suivant à être traversé par l'itinéraire (à droite), il passe en **vert** de façon permanente et la partie de l'itinéraire correspondante apparait en **violet** ;
- si le point cliqué est un point-cible mais pas le suivant immédiat (à gauche), il passe en **vert** pendant quelques secondes puis reprend sa symbolisation initiale ;
- si le point cliqué est un distracteur, donc non traversé par l'itinéraire (en haut), il passe en **rouge** pendant quelques secondes puis reprend sa symbolisation initiale.

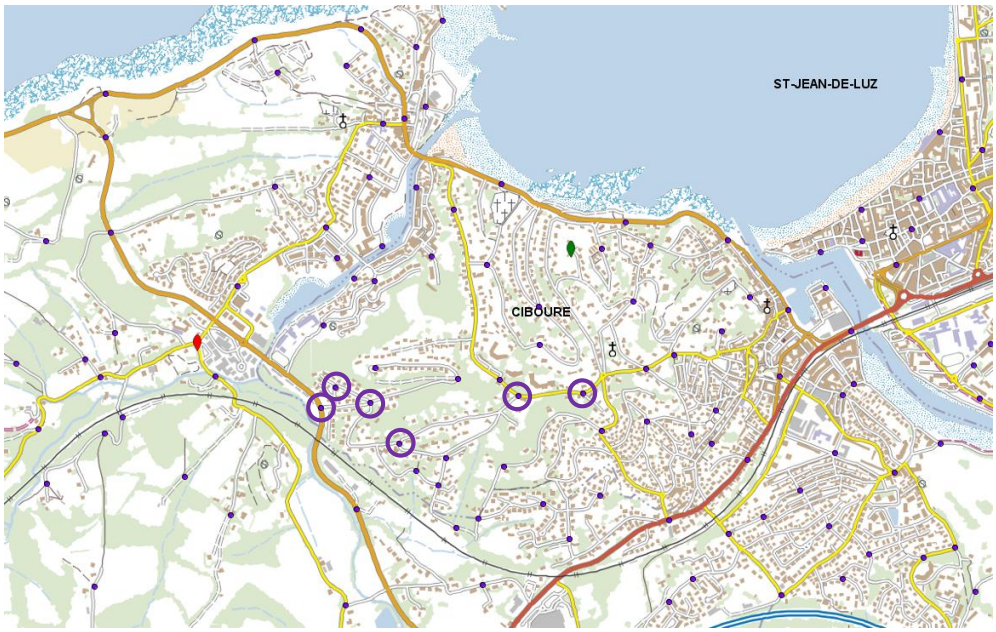


Figure 135. Symbolisation et densité des marqueurs choisis pour notre test utilisateurs. Les points-cibles entourés correspondent à notre itinéraire exemple et montrent la répartition spatiale irrégulière des marqueurs. Ils sont ici mis en évidence uniquement pour les besoins de l'illustration.

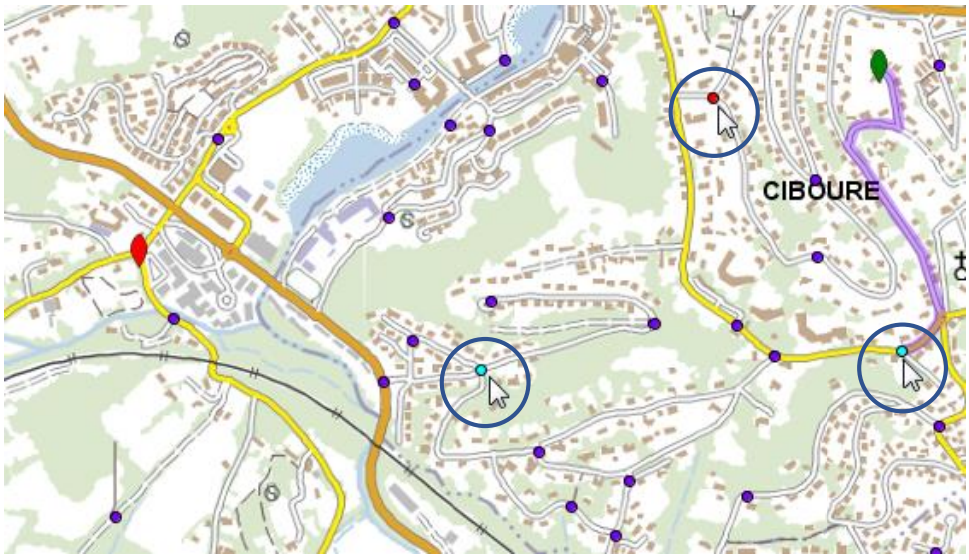


Figure 136. Illustration des rétroactions permettant à l'utilisateur de juger la pertinence de son action : si le point est bien le suivant (à droite), il passe en vert de façon permanente et la partie de l'itinéraire correspondante apparait en violet ; si le point est bien sur l'itinéraire mais qu'il n'est pas le suivant immédiat (à gauche), il passe en vert de façon temporaire ; s'il n'est pas du tout sur l'itinéraire (en haut), il passe en rouge de façon temporaire.

Pendant l'essai, l'itinéraire-cible est ainsi complété visuellement, chaque fois que l'utilisateur clique sur le point-cible suivant. Indiquer ainsi visuellement la partie de l'itinéraire-cible déjà parcourue permet de limiter les éléments que l'utilisateur doit mémoriser, pour ne mesurer que la charge cognitive relative à l'utilisation de la pyramide elle-même. Pour que l'utilisateur ne s'appuie pas seulement sur ce repère particulièrement saillant lors de sa navigation multi-échelle, nous avons choisi de n'afficher l'itinéraire-cible qu'au niveau de zoom maximal, lorsque les marqueurs sont visibles. De cette façon, l'utilisateur est obligé de mémoriser la localisation du dernier point-cible cliqué lorsqu'il dézoome pour vérifier l'itinéraire-source, en s'appuyant sur son contexte géographique. En revenant ensuite au niveau de zoom maximal, il retrouve l'itinéraire-cible et les points-cibles déjà saisis.

En cours de saisie, l'itinéraire-cible est symbolisé par un linéaire violet, dont la transparence permet de distinguer le réseau routier en arrière-plan. Enfin lorsque l'utilisateur clique sur le point d'arrivée, l'itinéraire-cible complété passe en violet opaque, pour **signaler visuellement la fin de l'essai**, comme l'illustre la Figure 137.

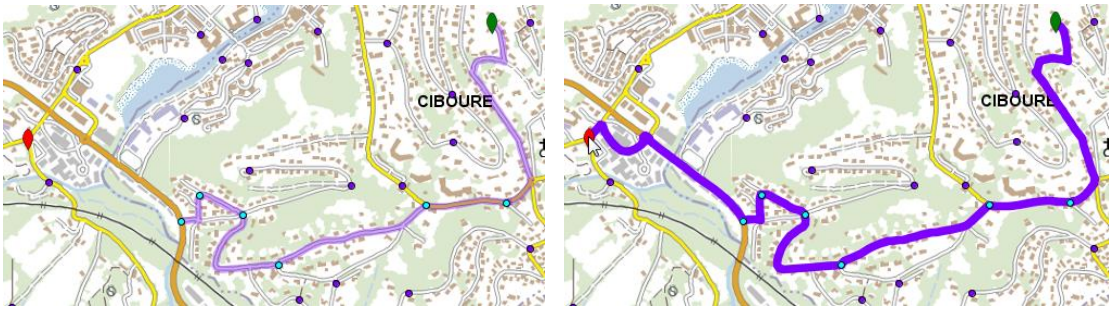


Figure 137. Lorsque l'utilisateur clique sur le point d'arrivée (en rouge), l'itinéraire-cible change de représentation (à droite) pour signaler la complétion de la tâche et la fin de l'essai.

Par ailleurs, pour éviter les biais dus à la mémorisation de l'itinéraire, un participant devra retrouver **un itinéraire différent à chaque essai**. Pour que la comparaison de ses performances entre les essais montre bien l'influence de la pyramide utilisée, il faudra donc que tous les itinéraires utilisés soient de **difficulté équivalente**. La production des différents itinéraires et la sélection des marqueurs seront présentés dans la partie §E.4.1.

Dans un premier temps, notre tâche demande donc à l'utilisateur de mémoriser une partie de l'itinéraire-source à petite échelle. Pour cela, il peut **s'appuyer sur le fond cartographique**, en mémorisant sa forme, sa connectivité au réseau ou prendre des repères dans son voisinage, en s'appuyant sur des espaces urbains. Ensuite, il doit **naviguer dans la pyramide** en zoomant pour afficher les marqueurs, en **s'appuyant alors sur les représentations intermédiaires** pour conserver ses repères et s'orienter dans la carte détaillée. Pour identifier le prochain point-cible, Il doit ainsi faire le lien entre la représentation cartographique la plus détaillée et les caractéristiques de l'itinéraire-source qu'il a mémorisé sur la carte la moins détaillée. Plus la transition de représentation sera facile à comprendre et utiliser, plus il pourra réaliser cette tâche rapidement et facilement. Théoriquement, **la réussite de cette tâche semble donc bien reposer sur la fluidité de navigation**, au sens où nous la définissons. De plus, les mécanismes qu'elle implique sont représentatifs de tâches couramment effectuées par les utilisateurs des cartes multi-échelles : se repérer géographiquement dans la carte, reconnaitre un point de repère à différentes échelles, suivre un itinéraire entre deux points.

E.2.3. Évaluation de la Réussite de la Tâche

A travers cette tâche multi-échelle, nous souhaitons évaluer la fluidité de navigation dans nos pyramides. Par définition, nous considérons la navigation dans une carte multi-échelle fluide lorsque l'utilisateur peut y réaliser une tâche cartographique de manière efficace, c'est-à-dire précisément, rapidement et facilement. Pour estimer la fluidité de navigation dans chacune de nos pyramides, nous choisissons donc d'évaluer la **précision, la rapidité et la difficulté avec laquelle l'utilisateur réalise cette tâche**.

Nous mesurons **la précision** comme la quantité de distracteurs sélectionnés, donc d'erreurs commises, relativement au nombre de points-cibles à trouver. Pour simplifier notre analyse, nous exprimons cette précision comme un pourcentage. Nous faisons ici le choix de ne compter qu'une seule erreur par distracteur, car malgré les rétroactions et la forte sensibilité de saisie, de nombreux utilisateurs cliquent souvent plusieurs fois sur un même point pour être sûrs de sa nature. Imposer à l'utilisateur de minimiser le nombre d'erreurs commises les encourage à utiliser des opérations de navigation pour vérifier régulièrement l'itinéraire-source. Sans cela, l'utilisateur pourrait être tenté de « *frauder* », c'est-à-dire de sélectionner les marqueurs au hasard, pensant ainsi réaliser la tâche plus rapidement. Pour limiter ce biais, nous affichons dans l'interface de test un compteur d'erreurs, pour encourager les participants à minimiser ce facteur. Pour ne pas les décourager, nous affichons aussi le nombre de points-cibles restants à trouver**. Mesurer la précision de la tâche nous permettra donc de détecter cette fraude éventuelle et de garantir que les performances utilisateurs dépendent des mécanismes que nous souhaitons évaluer et de la fluidité de navigation**.

Concernant **la rapidité**, nous mesurons le temps écoulé du lancement de l'essai par l'utilisateur, c'est-à-dire quand la carte et le nouveau point de départ sont affichés, à la sélection du point d'arrivée. Ici, nous choisissons de ne pas afficher le chronomètre pendant l'essai pour ne pas ajouter de facteur stress. Nous choisissons également de ne pas indiquer les temps réalisés à chaque essai, pour éviter que le participant n'ajuste son comportement au fil des essais.

Enfin, concernant **la difficulté**, nous souhaitons ici estimer la difficulté perçue et l'effort cognitif fourni par l'utilisateur pour accomplir la tâche. Ici, l'idéal serait de réaliser une **évaluation subjective**, en demandant au participant d'évaluer lui-même l'effort mental impliqué, via une échelle de Likert ou plus précisément un questionnaire ad hoc [Ziljstra 1993, pp. 47-104]. Cependant, nous craignons qu'ajouter cette évaluation à chaque essai démultiplie la durée totale du test et augmente l'effet de fatigue. Nous choisissons donc plutôt **d'enregistrer des métriques qualitatives**, qui illustrent potentiellement une difficulté à accomplir la tâche. Nous mesurons notamment les quantités d'opérations de navigation par pan et zoom, ainsi que le temps total et le nombre de fois où l'utilisateur a affiché l'itinéraire-source. L'idée sous-jacente ici est que plus l'utilisateur rencontre de difficultés à réaliser la tâche, plus il devra réaliser d'opérations de navigation et d'affichage de l'itinéraire-source. Nous enregistrons aussi systématiquement les **interactions unitaires de l'utilisateur**, pour mieux comprendre et expliquer a posteriori des résultats incohérents. Ces interactions comprennent les opérations de navigation par pan et zoom, la sélection des marqueurs avec leur position et l'affichage de l'itinéraire-source. De plus, nous demandons au participant **d'exprimer ses réflexions à haute voix**, selon le principe du *think aloud* [van Elzakker 2004, pp. 36-41]. Le test est réalisé en présence continue d'un instructeur, qui **prend en note** les réflexions de l'utilisateur et les difficultés de navigation observées pendant l'essai. Nous ajoutons également un questionnaire en fin de test, où nous demandons aux participants d'évaluer la variation de

complexité sur l'ensemble du test et de décrire les mécanismes cognitifs globalement utilisés. Le contenu de cette évaluation est présenté en Annexe L. Sans présenter tous les avantages d'une évaluation subjective, ce questionnaire nous permettra d'estimer les difficultés globalement perçues par l'utilisateur au cours du test, de vérifier la pertinence de notre protocole et de mieux comprendre le mécanisme de navigation multi-échelle.

Si l'on résume, pour réaliser la tâche que nous avons choisie, l'utilisateur doit sélectionner le plus rapidement possible et en faisant le moins d'erreurs possible, tous les points traversés par l'itinéraire. Pour cela il devra donc :

- dézoomer suffisamment et passer le pointeur sur le bouton correspondant pour afficher l'itinéraire-source ;
- mémoriser une partie de l'itinéraire ;
- zoomer pour afficher les marqueurs ;
- sélectionner les points-cibles dans l'ordre du point de départ au point d'arrivée ;
- puis recommencer cette séquence autant de fois que nécessaire pour compléter la saisie de l'itinéraire-cible.

Pour estimer la fluidité de navigation dans chacune de nos pyramides, nous avons ainsi choisi d'évaluer la **précision, la rapidité et la difficulté avec laquelle l'utilisateur réalise cette tâche**.

E.3. Protocole de notre Test Utilisateurs

Une fois la tâche choisie, il nous faut maintenant définir le protocole de notre test utilisateurs. Après avoir listé les **variables et facteurs impliqués** dans la partie §E.3.1, nous dressons dans la partie §E.3.2 le **plan d'expérience** de notre test utilisateurs, c'est-à-dire l'ensemble des conditions testées pour chaque essai et l'ordre dans lequel elles sont présentées à chacun des participants. Puis nous présentons notre **panel de participants** dans la partie §E.3.3. Enfin, nous détaillons le **déroulement d'une session type** avec un participant dans la partie §E.3.4.

E.3.1. Variables et Facteurs Impliqués

Pour dresser le plan d'expérience, il est nécessaire de définir les différentes **variables impliquées dans notre test utilisateurs**. Nous cherchons ici à évaluer les performances de l'utilisateur, pour une tâche de suivi d'itinéraire, en fonction de la pyramide utilisée. Entre les essais du test, nous ferons donc **varier la pyramide utilisée**, qui sera notre *variable indépendante*. Nous mesurerons son effet sur la fluidité de navigation, via la précision, la rapidité et la difficulté avec lesquelles l'utilisateur réaliser la tâche, qui seront nos *variables dépendantes*. Enfin, l'itinéraire suivi changera à chaque essai et il nous faudra donc prendre en compte son **influence potentielle**.

Pour dresser le plan d'expérience, il est aussi important de prendre en compte l'ensemble des **facteurs susceptibles d'influencer** les performances de l'utilisateur, pour tenter de les maitriser. Puisque nous menons un test contrôlé, de nombreux facteurs seront *contrôlés* ou constants au cours du test, comme l'environnement physique et informatique ou bien les conditions sonores et lumineuses dans lequel il est réalisé. Ainsi, les participants réalisent le test dans la même pièce, sur le même ordinateur et avec la même configuration d'écran. Ces facteurs ne risquent donc pas d'influencer ses performances de manière variable entre les différents essais. Pour aller plus loin, la présence continue de l'instructeur permet également de détecter les aléas extérieurs susceptibles de

perturber le participant dans la réalisation d'un essai en particulier. Cependant, si l'on est capable de détecter cet aléa, nous ne pourrons pas pour autant corriger son effet dans les résultats du test. Il est donc plus prudent ici de **réaliser plusieurs essais sur une même pyramide**, pour améliorer la significativité des résultats.

Par ailleurs, il est possible que l'utilisateur s'améliore globalement au cours du test à force de réaliser la même tâche, selon **un effet d'apprentissage** [Baenninger et Newcombe, 1989]. Il est donc possible que les essais réalisés en fin de test présentent de meilleurs performances que ceux présents en début de test, indépendamment des conditions testées, ce qui fausserait les résultats si les pyramides sont toujours testées dans le même ordre. **Nous mélangerons donc l'ordre de présentation des pyramides** au cours du test entre les participants, pour compenser statistiquement cette amélioration potentielle. Dans notre cas, cet effet peut être d'autant plus important si l'utilisateur ne maitrise pas initialement les mécanismes de navigation multi-échelle ou de lecture de carte. Pour minimiser cet effet, nous choisissons ici de sélectionner des participants qui maitrisent déjà ces mécanismes en général. Pour cela, nous choisirons un profil d'utilisateur en particulier et vérifierons les compétences de chaque participant via **un test d'auto-évaluation**, comme expliqué dans la partie §E.3.3. Nous avons également choisi d'inclure une **phase d'entrainement** à notre test, pour que les participants puissent s'habituer à l'exercice et à la manipulation de l'interface du test.

A l'inverse, il est aussi possible que l'utilisateur ressente les **effets de la fatigue** si le test dure trop longtemps, ce qui peut nuire à ses performances ou à son implication. Pour éviter ces effets, nous limitons la durée totale d'une session de test à **1 heure maximum**. Pour dresser notre plan d'expérience, nous devons maintenant déterminer le nombre d'essais à réaliser, le nombre de participants nécessaire et le principe d'ordonnancement de nos conditions testées pour chaque essai.

E.3.2. Plan d'Expérience, Nombre de Participants et Contre-Balancement

Pour que **l'entrainement** ait l'effet escompté, c'est-à-dire que le participant soit suffisamment à l'aise avec le maniement de l'interface et le principe de la tâche pour minimiser l'effet d'apprentissage au cours du test, il faut que **sa durée soit suffisante**. De plus, pour ne pas favoriser l'usage d'une pyramide en particulier, il est préférable que le participant ne soit pas plus entrainé sur une pyramide que sur une autre. Nous choisissons donc d'inclure 5 essais d'entrainement au test, à savoir **1 essai d'entrainement sur chaque pyramide**. Si l'on prend en compte la phase d'accueil du participant, le test d'auto-évaluation, la phase d'entrainement et l'évaluation subjective finale, nous considérons que la phase mesurée du test peut durer **jusqu'à 30 minutes** sur une session d'1 heure maximum, avec une marge de sécurité. Nous choisissons donc d'inclure **15 essais mesurés, soit trois répétitions sur chaque pyramide**. Nous visons donc une complexité des itinéraires pour qu'un essai puisse être réalisé en **moins d'1min30**. Chaque utilisateur réalisera donc 5 essais d'entrainement et 15 essais mesurés**,** avec chaque fois un itinéraire différent. Nous devrons donc produire **20 itinéraires différents** pour implémenter ce test utilisateurs.

Nous avons évoqué précédemment le problème de la complexité potentiellement variable des itinéraires utilisés, que nous détaillerons dans la partie §E.4.1. Pour contrebalancer statistiquement ce biais potentiel, il faut que l'influence de chaque itinéraire sur les performances mesurées soit égale sur chacune des pyramides. Autrement dit, il faut qu'un itinéraire soit testé autant de fois sur chaque pyramide, sur l'ensemble des participants. Pour simplifier le problème, nous choisissons dans

un premier temps de réserver les 5 mêmes itinéraires pour l'entrainement de tous les participants. Les 15 itinéraires testés dans les essais mesurés seront donc également les mêmes pour tous les participants. Etant donné la configuration choisie, chaque participant réalisera 3 essais et devra retrouver **3 itinéraires sur une même pyramide**. Pour que les 15 itinéraires soient testés sur une même pyramide, il faudra donc que notre panel de participants compte un **multiple de 5 personnes**. Utiliser un groupe important de participants permettrait d'améliorer la significativité d'un tel test, mais serait particulièrement coûteux en temps, puisqu'on ne peut réaliser qu'une session à la fois (même salle, même ordinateur). Finalement, conduire notre test utilisateurs avec **15 participants** nous semble le meilleur compromis entre le nombre d'échantillons pour la significativité du test et le coût de réalisation des sessions.

Par ailleurs, concernant l'ordre de présentation des pyramides au cours du test, nous pouvons ici soit présenter la variable « *pyramide* » **par bloc**, c'est-à-dire grouper les trois répétitions sur une même pyramide ; soit **mélanger les répétitions sur l'ensemble des essais**, comme l'illustre la Figure 138. Ordonner les répétitions par bloc est particulièrement utile lorsque les méthodes d'interaction ou les tâches varient au cours du test, à l'image de [Jakobsen et Hornbaek, 2011 ; Lobo et al., 2015]. Cela permet notamment de réaliser l'entrainement de chaque méthode en début de bloc, pour éviter toute confusion de l'utilisateur. Dans notre cas, nous utilisons la même tâche au cours du test et découper ainsi l'entrainement ne présenterait aucun intérêt. Néanmoins, cet ordonnancement permettrait d'ajouter une évaluation subjective à la fin de chaque bloc, pour évaluer la complexité de chaque pyramide en particulier. **Nous choisissons plutôt de mélanger les répétitions des pyramides sur l'ensemble des essais du test, en espérant mieux contrebalancer les biais potentiels dus à l'ordre de présentation.**

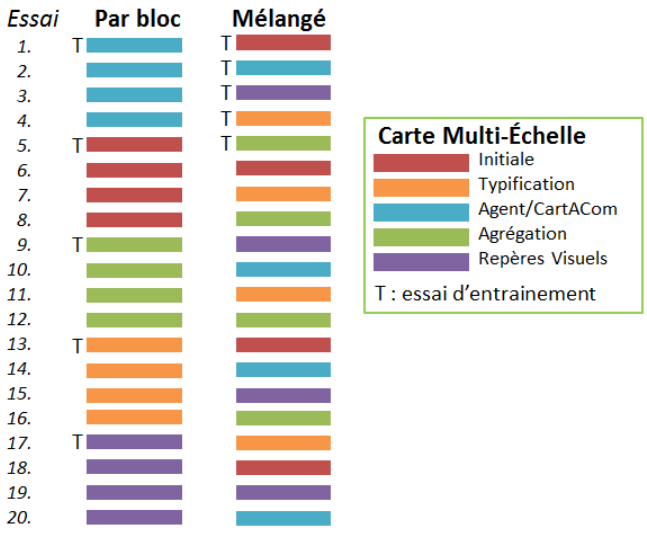


Figure 138. Différence d'ordonnancement de la variable pyramide, entre la méthode « par bloc » (à gauche) et un mélange sur l'ensemble des essais du test (à droite).

De plus, pour contrebalancer statistiquement l'effet potentiel de l'ordre de présentation des pyramides au cours du test, nous mélangeons les conditions testées [Cöltekin 2015] et utilisons ainsi 15 **séquences différentes entre les participants**, présentées dans la Figure 139. Chaque colonne représente la séquence utilisée pour un participant, chaque ligne indiquant les conditions testées pour un essai. La couleur représente la pyramide utilisée selon la légende de la Figure 138 et le nombre indique l'identifiant de l'itinéraire à retrouver. Pour produire ces 15 séquences différentes,

nous avons utilisé le principe du **carré latin pour l'ordonnancement des itinéraires**, avec trois carrés d'ordre 5 pour la partie « *Entrainement* » et un carré d'ordre 15 pour la partie « *Test mesuré* ». Dans cette dernière, chaque itinéraire est donc présent une et une seule fois par ligne et par colonne. Puis nous avons distribué les pyramides pour que :

- **les séquences de conditions testées par les participants soient différentes**, c'est-à-dire que chaque colonne du tableau soit différente ;
- **chaque pyramide soit testée trois fois par chaque participant**, c'est-à-dire qu'il y ait trois cases de la même couleur sur une colonne du tableau ;
- **chaque pyramide soit testée trois fois avec un même itinéraire sur l'ensemble des participants**, c'est-à-dire qu'il y ait exactement trois cases identiques dans l'ensemble de la partie « Test mesuré » du tableau (*condition non respectée pour la partie « Entrainement »*) ;
- **la pyramide utilisée change à chaque essai de test**, c'est-à-dire que deux cases qui se suivent dans une colonne ne soient pas de la même couleur.

	Part	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Entrainement		2	4	0	3	1	2	0	3	1	4	3	1	2	4	0
		4	1	2	0	3	3	1	4	2	0	2	0	1	3	4
		3	0	1	2	2	0	3	1	4	2	1	4	0	2	3
		1	3	4	4	0	1	4	2	0	3	4	2	3	0	1
		0	2	3	1	4	4	2	0	3	1	0	3	4	1	2
Test mesuré		14	5	18	17	13	12	10	8	19	16	15	6	11	9	7
		8	14	12	11	7	6	19	17	13	10	9	15	5	18	16
		11	17	15	14	10	9	7	5	16	13	12	18	8	6	19
		6	12	10	9	5	19	17	15	11	8	7	13	18	16	14
		5	11	9	8	19	18	16	14	10	7	6	12	17	15	13
		18	9	7	6	17	16	14	12	8	5	19	10	15	13	11
		7	13	11	10	6	5	18	16	12	9	8	14	19	17	15
		12	18	16	15	11	10	8	6	17	14	13	19	9	7	5
		17	8	6	5	16	15	13	11	7	19	18	9	14	12	10
		19	10	8	7	18	17	15	13	9	6	5	11	16	14	12
		13	19	17	16	12	11	9	7	18	15	14	5	10	8	6
		10	16	14	13	9	8	6	19	15	12	11	17	7	5	18
		9	15	13	12	8	7	5	18	14	11	10	16	6	19	17
		15	6	19	18	14	13	11	9	5	17	16	7	12	10	8
		16	7	5	19	15	14	12	10	6	18	17	8	13	11	9

Figure 139. Conditions testées pour chaque essai (ligne) par chacun de nos 15 participants (colonne) : la pyramide utilisée est représentée par la couleur, selon la légende de la Figure 138, le numéro indique quant à lui l'itinéraire utilisé (de 0 à 4 pour l'entrainement et de 5 à 19 pour le test mesuré).

E.3.3. Profil et Panel de Participants

Chaque personne est différente face à une tâche donnée, de par son expérience ou son habileté, ou bien en fonction de son âge, son genre, ses capacités physiques ou intellectuelles. La réponse au stimulus que l'on souhaite tester peut donc être très variable entre deux participants au profil différent. Nous choisissons donc de **recruter des participants présentant un profil similaire** dans

notre test, pour limiter le biais potentiel impliqué par la variabilité de ce facteur. Néanmoins, recruter ainsi un profil spécifique limite la généralisabilité de nos résultats. Pour que notre test reste pertinent, nous choisissons un profil que nous croyons représentatif, en partie au moins, des utilisateurs finaux des cartes topographiques multi-échelles.

Nous choisissons ainsi de recruter des participants qui **maitrisent déjà les outils de navigation multi-échelle et les mécanismes de lecture cartographique**. En revanche, nous considérons que des compétences en conception cartographique et en particulier en généralisation seraient un biais potentiel pour notre expérience. En effet, les participants seraient alors particulièrement sensibles aux choix et aux changements de représentation cartographique et leur comportement risquerait de ne plus être représentatif de celui des utilisateurs finaux des cartes multi-échelles.

Pour conduire notre test, nous choisissons de recruter nos participants parmi les **étudiants de 1ère année du cycle ingénieur de l'ENSG, école de formation supérieure en géomatique qui dépend de l'IGN**. Ce *recrutement de convenance* peut présenter certains biais s'il est répété trop fréquemment ou si les participants ne représentent pas les utilisateurs finaux [Harrower et al., 1997]. Dans notre cas, c'est la première fois que ce procédé de recrutement est utilisé à l'ENSG. De plus, le test étant réalisé en octobre 2017, c'est-à-dire un mois seulement après le début de leur scolarité, nous considérons qu'ils ont une formation scientifique généraliste mais non cartographique et qu'ils ne sont donc pas biaisés. Par contre, étant donné leur âge et leurs appétences, on peut s'attendre à ce qu'ils aient une **première expérience de la lecture cartographique et des systèmes de visualisation cartographique multi-échelle**, ce que nous recherchons. Notre panel de participants est finalement composé de 15 personnes, **9 hommes et 6 femmes, âgées de 17 à 21 ans (moyenne 19.7, médiane 20**). Ces participants sont recrutés sur la base du volontariat et sont gratifiés de points de bonification dans le cadre de leur scolarité.

Pour vérifier nos assertions sur leur expérience, nous menons un **questionnaire d'auto-évaluation** en parallèle de notre test, basé sur le *Santa Barbara Sense of Direction* (SBSOD) [Hegarty et al., 2002]. Cette évaluation subjective permet d'estimer rapidement les aptitudes spatiales environnementales d'un participant [Hegarty et al., 2002]. Il est composé de 15 affirmations concernant les compétences utilisateurs relatives au déplacement dans l'espace, à l'utilisation de cartes et à la modélisation de cartes mentales. Par exemple, on peut y retrouver les affirmations suivantes : « *Je me perds très facilement dans une nouvelle ville* », « *Je n'ai pas une très bonne carte mentale de mon environnement* » ou « *Je suis très doué pour lire les cartes* ». Pour répondre au questionnaire, l'utilisateur doit estimer son accord ou son désaccord avec ces affirmations, selon une échelle de Likert à 7 niveaux. Son score final est ensuite calculé comme une moyenne des scores de chaque affirmation, pondérée pour inverser les affirmations négatives. Ce test est proposé en anglais par [Hegarty et al., 2002], nous l'avons donc **traduit en français** pour les besoins de l'expérience, comme présenté en Annexe J. Nous avons choisi d'inclure ce questionnaire à notre test utilisateurs par précaution, pour détecter des hétérogénéités dans les profils de notre panel ou tenter d'expliquer a posteriori d'éventuels résultats incohérents entre nos participants.

Sans avoir de réelle échelle permettant l'interprétation des scores de cette évaluation, nous considérons néanmoins que comparer nos résultats à ceux de [Hegarty et al., 2006], obtenus sur une population de 221 participants, principalement âgés entre 17 et 22 ans, permettrait une estimation des aptitudes spatiales de nos participants. Cette comparaison est illustrée par le Tableau 6. D'une

part, nous constatons que les aptitudes spatiales de notre panel de participants se situent plutôt au-dessus de la moyenne de la population témoin (3.5-6.3 > 3.6), ce qui peut avoir un lien avec leur orientation scolaire. D'autre part, les scores de nos participants sont moins variables que ceux de la population témoin, étant donné leur amplitude et leur écart-type. En considérant cette variabilité plus faible, ainsi que leur âge et formation similaires, nous estimons que nos participants ont un profil équivalent en termes d'aptitudes spatiales. Ce facteur ne devrait donc pas venir biaiser notre test utilisateurs.

Statistiques	Nos participants	Population témoin
Moyenne	4.9	3.6
Écart-type	0.85	1.0
Minimum	3.5	1.6
Maximum	6.3	6.0

Tableau 6. Comparaison entre les scores obtenus par nos participants et la population témoin de [Hegarty et al., 2006]

E.3.4. Déroulement Type d'une Session du Test Utilisateurs

Toutes les sessions de test ont été réalisées dans les **mêmes conditions** environnementales et matérielles, dans un bureau de l'ENSG à Champs-sur-Marne. Chaque session a été réalisée individuellement et en **présence continue du même instructeur** (nous-même). Les sessions du test se sont déroulées au mois d'octobre 2017, étalées sur trois jeudis après-midi consécutifs. Cette partie décrit le **déroulement type d'une session avec un participant, qui dure entre 45 minutes et 1 heure**.

Après avoir été accueilli et informé du principe de l'expérience, c'est-à-dire qu'il s'agissait de réaliser un exercice interactif dans une interface de navigation cartographique, le participant est invité à signer le **formulaire de consentement**, présenté en Annexe I. Puis, le participant est invité à répondre au **questionnaire d'auto-évaluation de ses aptitudes spatiales**, mentionné précédemment et présenté en Annexe J.

Une fois ces formalités complétées sur papier, le participant est invité à suivre sur l'ordinateur une **démonstration de la tâche** par l'instructeur qui explique son principe, les contrôles de l'interface et les conditions de sa réussite. Le contenu de cette démonstration est identique pour tous les participants et est présenté en Annexe K.

Ensuite, le participant réalise la **phase d'entrainement** composée de 5 essais en conditions réelles, pour limiter le facteur d'apprentissage susceptible d'améliorer ses performances au cours du test. Les objectifs de cet entrainement sont multiples : prise en main de l'interface, familiarisation avec la tâche, mais aussi **rectification du comportement de l'utilisateur**. En effet, notamment lorsqu'un participant commet trop d'erreurs sans vérifier l'itinéraire-source, nous nous autorisons à lui rappeler l'objectif double de la tâche, en l'encourageant à prendre plus de précautions. Durant cet entrainement, les participants sont également autorisés à poser des questions à l'instructeur sur la tâche, le maniement de l'interface ou sur le contenu cartographique. **Une pause** marque ensuite la fin de l'entrainement. Le participant y est encouragé à poser ses dernières questions éventuelles et les conditions de réussite de la tâche lui sont rappelées.

Le participant passe ensuite à la **phase mesurée** du test, composée de 15 essais enregistrés. Pendant cette phase, le participant peut faire des pauses entre les différents essais s'il le souhaite.

L'instructeur quant à lui n'intervient en aucun cas mais prend des notes sur le déroulé du test ou sur les réflexions énoncées par le participant. Le but est ici de **mieux comprendre le mécanisme cognitif de navigation multi-échelle**, en relevant par exemple la stratégie de mémorisation et les points de repères adoptés par l'utilisateur pour accomplir la tâche. Cela permet aussi d'identifier les difficultés rencontrées par l'utilisateur qui ne seraient pas liées à la carte multi-échelle, mais plutôt à l'itinéraire ou à l'interface, pour détecter d'éventuels biais.

Enfin, le participant est invité à remplir l'**évaluation subjective** mentionnée précédemment et présentée en Annexe L. Cette évaluation est réalisée sur papier. Elle vise à prendre en compte les perceptions de l'utilisateur quant à la difficulté globale de l'expérience, ainsi qu'à mieux comprendre le mécanisme cognitif de la navigation multi-échelle.

Pour résumer, nous souhaitons évaluer l'influence du contenu de la carte multi-échelle utilisée sur sa fluidité de navigation, mesurée par **le pourcentage d'erreurs** et **le temps de complétion** de la tâche mesurée, mais aussi par la **difficulté perçue** par l'utilisateur, estimée quant à elle par des **métriques d'interaction, une observation continue de l'instructeur et une évaluation subjective globale**. Pour minimiser les biais potentiels, nous réalisons ici un test contrôlé et limitons sa **durée totale à 1 heure** pour éviter l'effet de fatigue. Pour limiter l'effet d'apprentissage, nous ajoutons une **phase d'entrainement** et **mixons l'ordre de présentation** des conditions entre les participants. Nous menons ce test avec **15 participants**, en espérant atteindre un bon compromis entre significativité des résultats, contrebalancement du biais potentiel des itinéraires et coût de réalisation de l'expérience. Ces participants ont un profil similaire, qui nous semble relativement **représentatif des utilisateurs finaux des cartes multi-échelles**, en termes d'aptitudes et d'expérience.

E.4. Implémentation de notre Test Utilisateurs

Cette partie présente **l'implémentation de notre test utilisateurs** selon la tâche et le plan d'expérience présentés dans les parties précédentes. La partie §E.4.1 présente ainsi les critères que nous avons appliqué pour choisir les itinéraires et les marqueurs utiles à la tâche demandée. Puis les parties §E.4.2 et §E.4.3 présentent respectivement l'implémentation de l'interface graphique et des mesures du test.

E.4.1. Processus de Sélection des Marqueurs et des Itinéraires

Cette partie présente les processus de **sélection des marqueurs et des différents itinéraires** utilisés dans notre test utilisateurs, à partir du réseau routier détaillé de la carte existante au 1 : 25k.

Comme mentionné précédemment, nous avons initialement choisi de sélectionner les marqueurs comme un sous-ensemble des intersections du réseau routier. Cette idée reprend la logique de suivi d'un itinéraire, où l'on s'interroge principalement sur la direction à suivre à l'approche d'une intersection. Après quelques tests de la tâche en pratique, il nous semble finalement tout aussi pertinent de **sélectionner des points de la géométrie (vertex)**, qu'ils matérialisent une intersection ou non. Cette sélection donne un résultat plus dense qu'avec les intersections, notamment en contexte rural où le réseau routier est assez clairsemé. Nous aurons ainsi la possibilité d'avoir des marqueurs sur un tronçon linéaire sans croisement, ce qui permettra d'une part de rassurer le participant plus fréquemment quant à sa progression le long de l'itinéraire et d'autre part, d'homogénéiser la quantité de points-cibles par itinéraire, pour lisser la complexité entre itinéraires.

Pour sélectionner les marqueurs, nous avons donc appliqué le processus décrit par la Figure 140, **à l'aide des outils de géotraitements du logiciel Qgis** indiqués. Dans un premier temps, nous avons ainsi récupéré les nœuds du réseau routier. Puis nous avons construit une grille vecteur, en choisissant un pas constant de 400 m. En reportant les coordonnées (x ; y) de chaque case dans un attribut des points qui l'intersectent, nous avons ensuite pu appliquer une sélection aléatoire dans ce sous-ensemble, en conservant 2% des points de chaque case. Ainsi, la **densité initiale du réseau routier est respectée** dans la densité des marqueurs. Enfin, nous avons corrigé manuellement le résultat de ce processus, lorsque les points obtenus présentaient une ambiguïté potentielle pour la tâche demandée, par leur proximité ou leur position, comme illustré respectivement à gauche et à droite de la dernière image de la Figure 140.

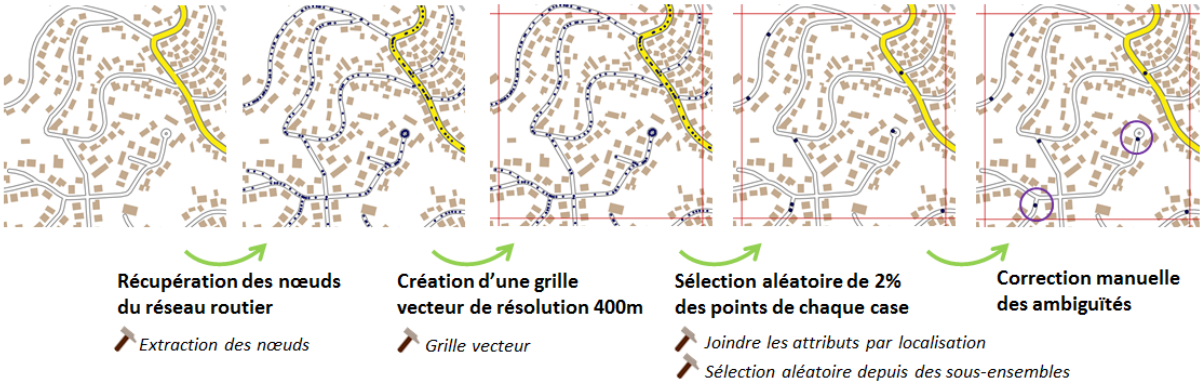


Figure 140. Processus de sélection semi-automatique des marqueurs à partir du réseau routier détaillé de la carte existante au 1 : 25k, à l'aide des outils Qgis mentionnés. Une correction manuelle est réalisée a posteriori, pour supprimer les ambigüités comme les points trop proches (entouré à gauche) ou sur l'axe d'un rond-point (entouré à droite), potentiellement ambigu si l'utilisateur ne pense pas à prendre le rond-point dans le sens giratoire.

La Figure 141 illustre ainsi la **densité et la répartition spatiale des 2338 marqueurs** sur notre zone d'étude. Tous ces marqueurs seront affichés à chacun des essais du test utilisateurs.

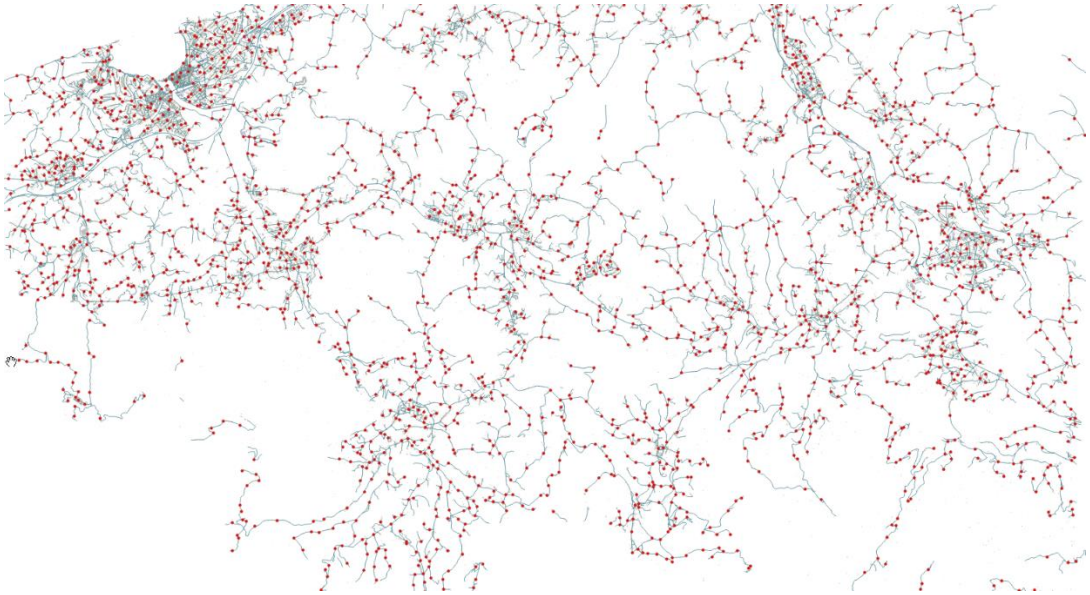


Figure 141. Densité et répartition des marqueurs sur notre zone d'étude, ici représentés par des points rouges sur le réseau routier détaillé non symbolisé, pour les besoins de l'illustration.

Concernant le processus de **sélection des itinéraires** cette fois, nous avons quatre objectifs à respecter, comme mentionné précédemment:

- leur complexité doit être le plus possible équivalente, pour ne pas biaiser les résultats ;
- leur complexité doit correspondre à un essai réalisable en 1min-1min30 pour respecter la durée globale du test et éviter un effet de fatigue ;
- leur tracé doit être en grande partie composé d'axes présents dans la carte simplifiée au 1 : 100k, pour que la tâche soit réalisable, donc d'axes routiers majeurs ;
- leurs tracés doivent comporter un minimum de parties communes, pour éviter les effets d'apprentissage.

Nous devons donc dans un premier temps identifier les **facteurs expliquant une différence de complexité entre deux itinéraires,** comme illustrés par la Figure 142. Selon nous, il faut ici prendre en compte les facteurs suivants :

- la longueur et la sinuosité de sa géométrie ;
- le nombre de changements de directions de son tracé ;
- sa connectivité au réseau, c'est-à-dire le nombre de routes qui le croisent ;
- la densité locale du réseau routier et du bâti autour de l'itinéraire, qui augmente la complexité visuelle du fond cartographie avoisinant ;
- son emprise géographique globale, qui implique plus ou moins de déplacements dans la carte ;
- la quantité et la position des points-cibles qui le composent, qui représentent une perte de temps (identification et sélection) mais qui aident l'utilisateur à suivre l'itinéraire en jalonnant son effort.

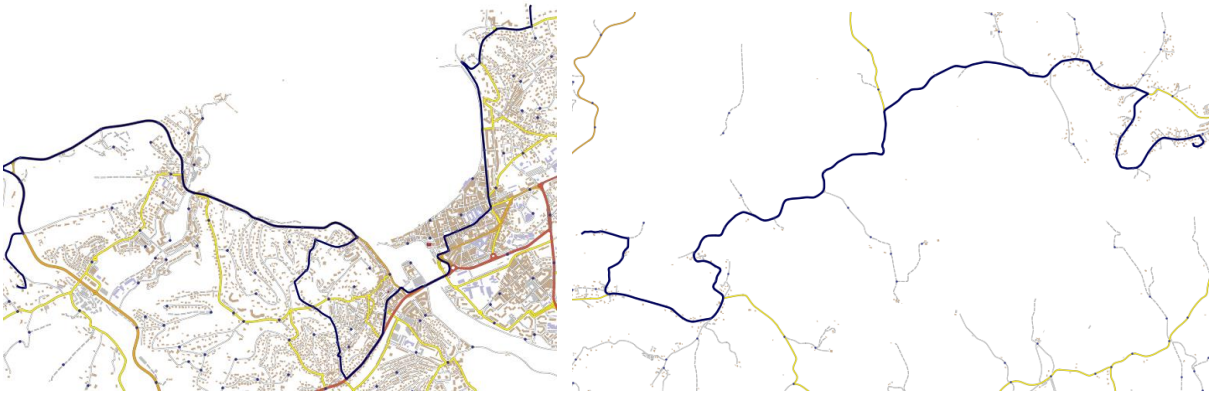


Figure 142. Différence de complexité entre deux itinéraires, qui peut ici s'expliquer par les différences de contexte géographique, le nombre de changements de directions et la sinuosité de leur tracé.

Etant donnée la zone géographique limitée sur laquelle nous travaillons, il n'est **pas possible de créer 20 itinéraires ayant strictement les mêmes caractéristiques** pour chacun de ces facteurs, tout en minimisant les parties communes. Nous avons donc choisi de façon empirique de compenser une caractéristique différente par une autre. Par exemple, un tracé en zone moins dense sera compensé par une longueur et une sinuosité plus importante. Pour valider ce processus, nous avons **mené des pré-tests** sur une même pyramide, pour calibrer la complexité visée pour un essai d'1min-1min30 et pour détecter des différences de complexité importantes entre itinéraires. Cependant, le faible nombre de participants à ce pré-test ne nous permet pas de garantir une complexité constante. Parmi les 20 itinéraires testés, nous avons donc **écarté les 5 pour lesquels nous avions le plus de doute, en les réservant pour la phase d'entrainement**.

En pratique, les itinéraires ont été produits à partir du réseau routier détaillé de la carte existante au 1 : 25k, à l'aide de l'extension *pgrouting*[1] de Postgis, qui permet de calculer des itinéraires entre deux points à partir d'un jeu de données de réseau. Dans notre cas en particulier, nous n'obtenons pas de plus courts chemins, car nous avons utilisé une pondération pour que les tronçons importants pour le réseau (connectivité, nature) et visuellement saillants (couleur, longueur du stroke) soient utilisés en priorité. Ces facteurs étant pris en compte dans l'algorithme de généralisation du réseau routier, cela nous assure d'avoir **une majeure partie de l'itinéraire encore présente sur nos représentations simplifiées**. Puis, nous avons manuellement adapté ce résultat automatique, pour obtenir une complexité similaire entre les itinéraires et supprimer les ambiguïtés potentielles. La Figure 143 représente finalement la **complexité et la répartition spatiale des 20 itinéraires** utilisés dans notre test utilisateurs.

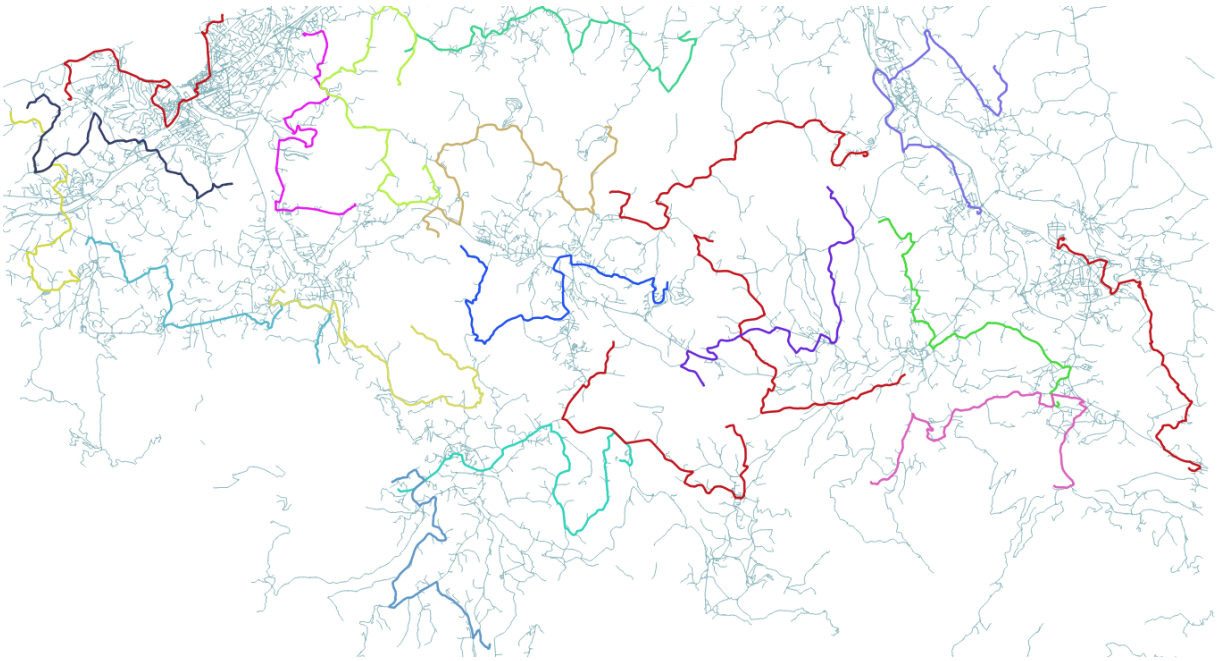


Figure 143. Complexité, répartition spatiale et géométrie des itinéraires sur notre zone d'étude, ici représentés par des tronçons colorés sur le réseau routier détaillé non symbolisé, pour les besoins de l'illustration. Les itinéraires rouges sont les itinéraires de la phase d'entrainement et ont une complexité relativement variable.

E.4.2. Interface Graphique et Implémentation de la Tâche

Comme mentionné précédemment en partie §D.5.2, nous avons choisi d'utiliser **le système ZVTM pour développer l'interface graphique** de notre test utilisateurs car il présente pour nous un double avantage. D'une part, il permet de visualiser nos pyramides à la structure atypique et d'autre part il fournit de nombreuses méthodes d'enregistrement et de paramétrage des interactions utilisateurs. Nous avons déjà expliqué dans la partie §D.5.3 comment étaient chargées nos pyramides dans ce système. Cette partie détaille cette fois **l'organisation de l'interface graphique utilisée dans le test, l'implémentation de la tâche de suivi d'itinéraire, le chargement du plan d'expérience et la configuration des méthodes d'interaction disponibles**. Les méthodes d'évaluation et d'enregistrement de la réussite de la tâche sont quant à elles présentées dans la partie suivante

[1] http://pgrouting.org/

§E.4.3.

Pour les besoins de l'expérience, l'interface de visualisation ZVTM est encapsulée dans une **fenêtre classique implémentée en Java Swing**. Comme illustré par la Figure 144, nous réservons une grande partie de la fenêtre à la visualisation de la carte multi-échelle et le bandeau supérieur pour les informations et boutons utiles au test. Nous ajoutons ainsi les **compteurs** *Points trouvés* et *Nombre d'erreurs* commises à gauche, ainsi qu'un compteur *Itinéraire* au milieu, indiquant l'avancement du test. A droite, nous ajoutons le **bouton *Itinéraire***, permettant l'affichage à la demande de l'itinéraire-source, uniquement disponible en-deçà d'une certaine échelle. Enfin, nous ajoutons un **bouton *Suivant***, pour lancer l'essai suivant, uniquement disponible quand l'utilisateur clique sur le point d'arrivée de l'itinéraire et que l'essai courant est terminé. Pour distinguer l'activation de ces boutons, nous utilisons deux symbolisations différentes, représentées par la Figure 145. Pour le bouton *Itinéraire* notamment, **une couleur plus vive est utilisée pour l'état activé**, pour que l'utilisateur soit rapidement conscient de la possibilité d'afficher l'itinéraire.

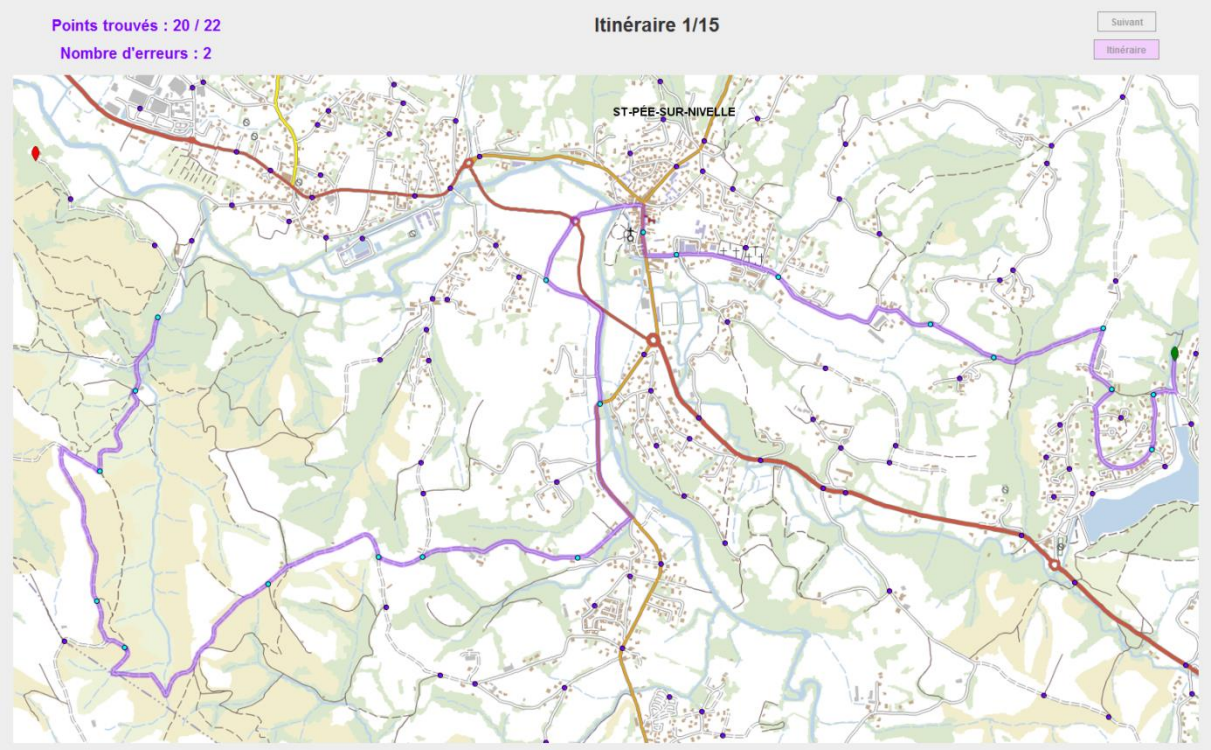


Figure 144.Interface graphique de notre test utilisateurs, au cours du premier essai (Itinéraire 1). A cet instant, l'utilisateur a trouvé 20 des 22 points-cibles de l'itinéraire et a cliqué sur 2 distracteurs par erreur. A cette échelle, le bouton *Itinéraire* n'est pas disponible et l'essai n'étant pas terminé, le bouton *Suivant* ne l'est pas non plus.

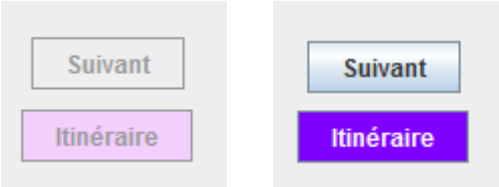


Figure 145. Différence de symbolisation entre les états inactifs à gauche et activés à droite, pour les boutons *Suivant* et *Itinéraire* de l'interface graphique.

Pour débuter une session du test avec un participant, l'interface graphique est **initialisée avec une instance spécifique de l'ordonnancement des conditions** présenté dans la Figure 139. Pour cela, notre implémentation prend en entrée un fichier CSV contenant pour chaque essai du test les identifiants de la pyramide et l'itinéraire à utiliser. Le **plan d'expérience est ainsi modulable** en pratique, ce qui nous a notamment permis d'adapter facilement le test à d'autres formats, comme des démonstrations lors d'événements de communication scientifique. Au lancement d'un essai du test, **les conditions de la tâche** sont ainsi chargées dans l'interface de visualisation, c'est-à-dire la pyramide et l'itinéraire, d'après les conditions spécifiées par ce fichier CSV.

Comme déjà expliqué en §D.5.3, la **pyramide** est chargée via l'API ZUIST à partir du fichier *scene.xml*. En plus de ce contenu cartographique, nous affichons les **toponymes** préalablement écartés du fond cartographique. Ces objets sont modélisés comme des objets texte (classe *VText*), visibles quelle que soit l'échelle. Cette modélisation permet de maintenir leur position relativement à la carte et leur taille de police (option *scaleIndependant*), en **assurant ainsi une cohérence visuelle au fil des échelles**. Bien sûr, cette solution est ici applicable car nous n'avons que 6 toponymes sur l'ensemble de la zone d'étude, qui ne présentent donc aucun conflit spatial. Une densité plus importante imposerait l'utilisation d'un algorithme d'élimination ou d'optimisation de leur placement.

L'**itinéraire-source** est quant à lui modélisé comme un objet vectoriel de type polyligne (classe *DPath*) et affichable uniquement à partir d'une certaine échelle lorsque le pointeur survole le bouton *Itinéraire*. Les **points de départ et d'arrivée** sont automatiquement générés à partir des extrémités de l'itinéraire, représentés par des marqueurs image (classe *VImage*). Les **marqueurs** sont modélisés comme des points (classe *VCircle*), affichés uniquement lorsque l'altitude est minimale, c'est-à-dire au plus grand niveau de zoom. Les points-cibles correspondant à l'itinéraire courant sont détectés automatiquement par intersection spatiale et sont typés comme tels pour générer une rétroaction différente lorsque l'utilisateur les sélectionne. Nous implémentons par ailleurs ces rétroactions pour qu'elles soient déclenchées lorsque l'utilisateur clique sur un marqueur. Enfin, l'itinéraire-source est découpé à partir de ces points-cibles et chaque tronçon résultant est modélisé dans un nouvel objet polyligne, pour former les parties de l'**itinéraire-cible**. Ces objets sont masqués dans un premier temps, puis révélés au cours de l'essai lorsque l'utilisateur clique sur le point-cible suivant, mais ne sont alors toujours affichés qu'à l'altitude minimale, c'est-à-dire au plus grand niveau de zoom.

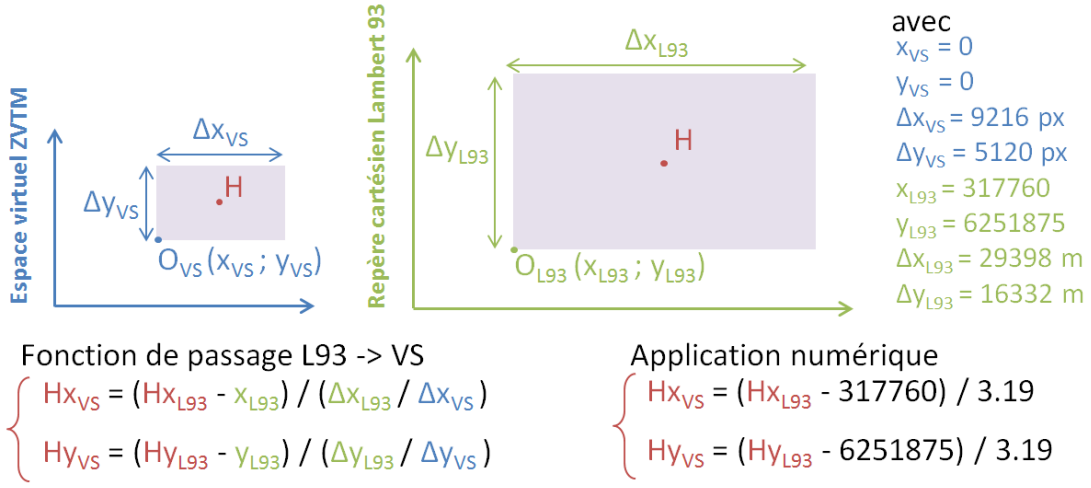


Figure 146. Fonction de passage des coordonnées cartésiennes en Lambert 93 aux coordonnées dans l'espace virtuel ZVTM, appliquant une translation puis une homothétie.

Tous ces objets vectoriels sont spatialement référencés par leurs **coordonnées dans l'espace virtuel** ZVTM. Pour obtenir ces coordonnées à partir de leurs coordonnées cartésiennes en Lambert 93, nous appliquons une translation puis une homothétie, obtenant la fonction de passage illustrée par la Figure 146.

L'implémentation par défaut de ZVTM fournit un **accès direct aux interactions de l'utilisateur** via des *écouteurs d'événement*s, comme les opérations de déplacement, de zoom ou de clic dans l'interface de visualisation. Nous avons utilisé ces méthodes pour configurer les plages d'échelles d'affichage des différents types d'objets, les rétroactions des marqueurs mais aussi les méthodes de mesures et d'enregistrement des performances de l'utilisateur, que nous présentons maintenant.

E.4.3. Mesures et Enregistrements des Performances Utilisateur

Comme détaillé dans la partie §E.2.3, pour estimer la fluidité de navigation dans nos pyramides, nous avons choisi de mesurer la précision, la rapidité et la difficulté avec lesquelles l'utilisateur réalise la tâche. Cette partie détaille l'implémentation de ces mesures.

Pour chaque essai, on enregistre donc le nombre de **points-cibles à trouver, le nombre d'erreurs commises et le pourcentage d'erreurs**, pour simplifier l'analyse statistique du fichier résultats. Le nombre de points-cibles par itinéraire n'est en effet pas constant entre les itinéraires, pour essayer de compenser le cas échéant une différence sur un autre facteur de complexité (longueur, sinuosité, nombre de virages, densité locale etc.). On considère ici que plus il y a de points à trouver, plus l'utilisateur est susceptible de commettre une erreur.

Pour chaque essai, on enregistre le **temps de complétion** de la tâche, mesuré comme la différence de temps entre le moment où l'essai est lancé, en pratique lorsque l'utilisateur clique sur le bouton *Suivant* à la fin de l'essai précédent ; et le moment où l'utilisateur clique sur le point d'arrivée. Le calcul de cette métrique est donc implémenté dans l'écouteur d'événement sur le point d'arrivée.

Pour mieux comprendre ces résultats bruts, analyser la stratégie employée par l'utilisateur et la **difficulté qu'a représentée** la tâche, nous enregistrons également des **métriques d'interaction**. Pour chaque essai nous enregistrons **le nombre de fois et le temps total pendant lequel l'itinéraire-source a été affiché** par l'utilisateur, ainsi que la **quantité d'opérations de navigation**, c'est-à-dire de zoom (en altitude) et de déplacement (en distance écran) effectuées.

Les résultats de ces mesures sont **enregistrés automatiquement** dans un fichier CSV à la fin de chaque essai, puis le fichier global est archivé en fin de session et finalement concaténé entre tous les participants pour les analyses statistiques. Pour chaque essai, nous enregistrons donc également **l'identifiant du participant**, le **numéro de l'essai**, si **l'essai fait partie de l'entrainement** (ici nous enregistrons en effet l'ensemble du test, même si la phase d'entrainement est exclue de l'analyse statistique), ainsi que la **pyramide et l'itinéraire utilisés**.

En plus de ces mesures, nous enregistrons également un **journal de toutes les interactions utilisateur**, qui pourra nous permettre d'analyser plus en détail la stratégie employée par l'utilisateur pour réaliser la tâche, donc potentiellement de comprendre et expliquer des différences de performances entre deux essais. Nous enregistrons donc pour chaque interaction **l'instant où elle est effectuée et son type**, parmi :

- le chargement d'un essai, avec son numéro et l'indication entrainement ou non ;
- une opération de navigation unitaire, avec les coordonnées de la caméra et les distances ou altitudes parcourues ;
- le chargement d'une nouvelle représentation cartographique, c'est-à-dire le changement d'intervalles d'échelles tels que définis dans le fichier scene.xml ;
- la demande d'affichage de l'itinéraire-source, avec le temps d'affichage ;
- les sélections de marqueurs, avec son type (distracteur, prochain point-cible ou point-cible) et ses coordonnées dans l'espace virtuel.

Les résultats des mesures de performances utilisateur seront analysés dans la partie §E.5.1, tandis que les métriques d'interaction seront interprétées dans la partie §E.5.3.

Les **écouteurs d'événements** fournis par **système de visualisation ZVTM** nous ont permis d'implémenter nos méthodes de mesures de performances et des métriques d'interactions utilisateurs. Ces résultats, enregistrés dans des fichiers CSV, nous permettrons **d'analyser de manière quantitative et qualitative la fluidité de navigation dans nos pyramides**. Nous présentons maintenant leur analyse statistique.

E.5. Analyse des Résultats de notre Test Utilisateurs

Dans une première partie §E.5.1, nous **étudions l'influence potentielle de la pyramide** sur les performances et les difficultés de l'utilisateur, pour évaluer nos hypothèses et l'apport de nos propositions. Dans une seconde partie §E.5.2, nous cherchons à vérifier l'influence des **variables impliquées dans l'expérience, susceptibles d'avoir biaisé nos résultats**. Puis nous faisons une analyse plus qualitative des résultats, visant à évaluer les difficultés rencontrées par l'utilisateur lors du test, en regardant respectivement dans la partie §E.5.3 et §E.5.4 les résultats des **métriques de navigation et du questionnaire qualitatif**. Enfin, nous discutons les **résultats de notre test utilisateurs** de manière globale dans la partie §E.5.5. L'ensemble des analyses statistiques évoquées dans cette partie ont été réalisées avec le **logiciel R** [R Development Core Team, 2005]. Précisons que pour tous les diagrammes en boite illustrant cette partie, chaque boite est bornée par le premier et le troisième quartile de la série statistique, et coupée par sa médiane.

E.5.1. Influence de la Carte Multi-Échelle sur la Réussite de la Tâche

Dans cette partie, nous cherchons donc à voir si la variable ***pyramide*** a une influence sur les performances de l'utilisateur, décrites par les aspects et variables suivants :

- la précision de l'utilisateur avec la variable ***erreurs*** : quantité d'erreurs commises, mesurée comme le pourcentage d'erreurs commises par rapport au nombre de points-cibles à trouver dans l'itinéraire-cible ;
- la rapidité de l'utilisateur avec la variable ***temps*** : temps écoulé entre le lancement de l'essai et la sélection du point d'arrivée.

Notons en préambule que la variable *pyramide* est une **variable factorielle à cinq niveaux** (pyramide initiale, typification, Agent/CartACom, agrégation, repères visuels). Notre expérience comporte 15 participants ou *sujets*. Chacun ayant réalisé 15 essais mesurés, nous avons finalement 225 échantillons. Selon notre plan d'expérience, nos échantillons **ne sont pas indépendants**, puisque chaque *sujet* teste toutes les pyramides, plusieurs fois chacune. Nous devrons donc prendre en compte l'influence de la variable *sujet* sur nos mesures.

La Figure 147 représente la répartition **des pourcentages d'erreurs observés en fonction de la pyramide utilisée**. Cette distribution nous laisse à penser que les utilisateurs font **en moyenne moins d'erreurs avec les pyramides typification, agrégation et repères visuels,** qu'avec la pyramide initiale et la pyramide Agent/CartACom.

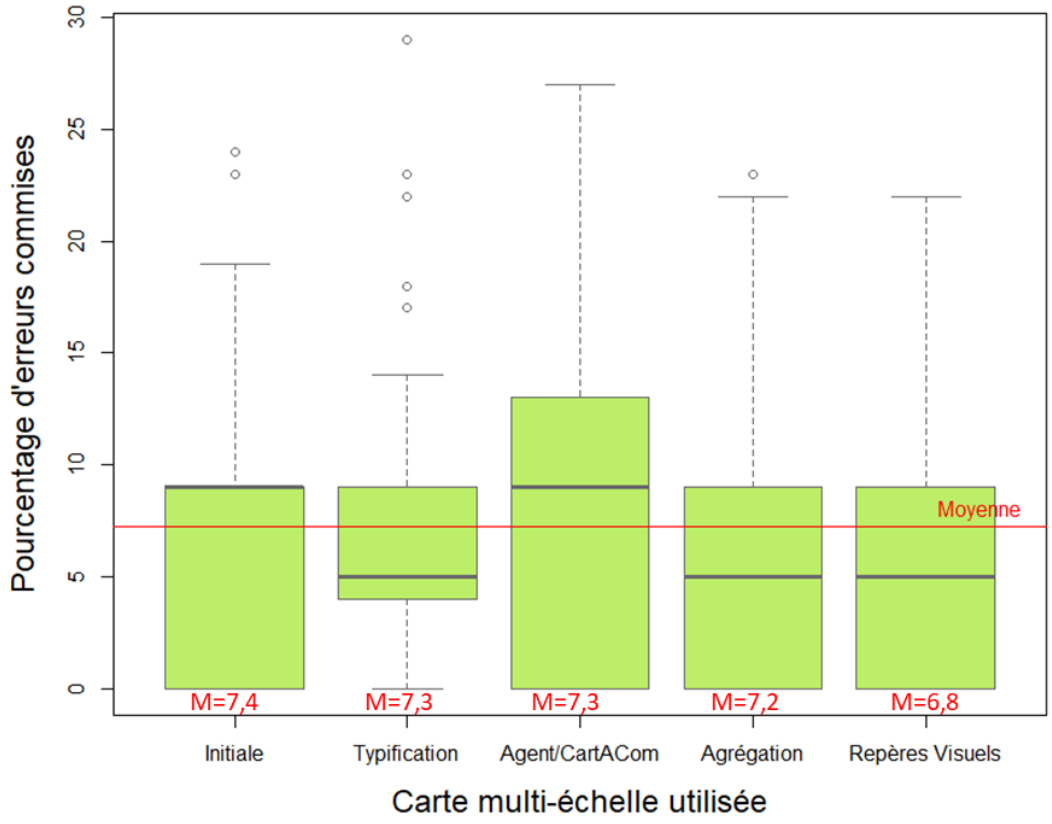


Figure 147. Répartition des pourcentages d'erreurs observés par rapport à la pyramide utilisée. La moyenne de l'ensemble des essais du test est représentée en rouge, les moyennes sont aussi indiquées pour chaque groupe.

Pour vérifier si les différences observées entre ces groupes d'échantillons utilisant une pyramide différente sont significatives, nous souhaitons ici utiliser une **ANOVA à mesures répétées**, qui contrairement à une ANOVA classique prend en compte l'influence du participant dans son calcul, pour l'écarter et pouvoir distinguer l'influence des autres variables. Pour appliquer cette méthode, il nous faut d'abord vérifier que la variable observée suit une loi normale dans notre échantillon et que les variances des groupes sont homogènes.

Pour vérifier la normalité, nous utilisons ici le test de Shapiro-Wilk, dont l'hypothèse nulle est que la population est normalement distribuée. Le résultat est significatif sur notre échantillon ($W = 0.89$, *p-value* <0.05), on rejette donc l'hypothèse nulle et la distribution pour la variable *erreurs* ne suit pas une loi normale. Il faut donc utiliser un test non-paramétrique. Ici, nous avons utilisé le test de Friedman, équivalent non-paramétrique de l'ANOVA à mesures répétées, pour analyser la variance de la variable *erreurs* en fonction de la *pyramide* utilisée. L'hypothèse nulle du test de Friedman est que les médianes des groupes soient égales. Le résultat s'est révélé non significatif ($chi^2 = 1.27$, *p-value* $= 0.87$) et nous ne pouvons pas rejeter l'hypothèse nulle. **Nous ne pouvons donc pas prouver l'influence de la pyramide sur la précision de la tâche**.

La Figure 148 représente cette fois la distribution **des temps de complétion observés en fonction de la pyramide utilisée**. Les différences entre les groupes sont relativement ténues, mais la pyramide initiale présente une moyenne et une médiane supérieure à celles des autres groupes. De la même manière que pour la variable erreurs, nous vérifions maintenant s'il existe une différence significative entre nos groupes d'échantillons.

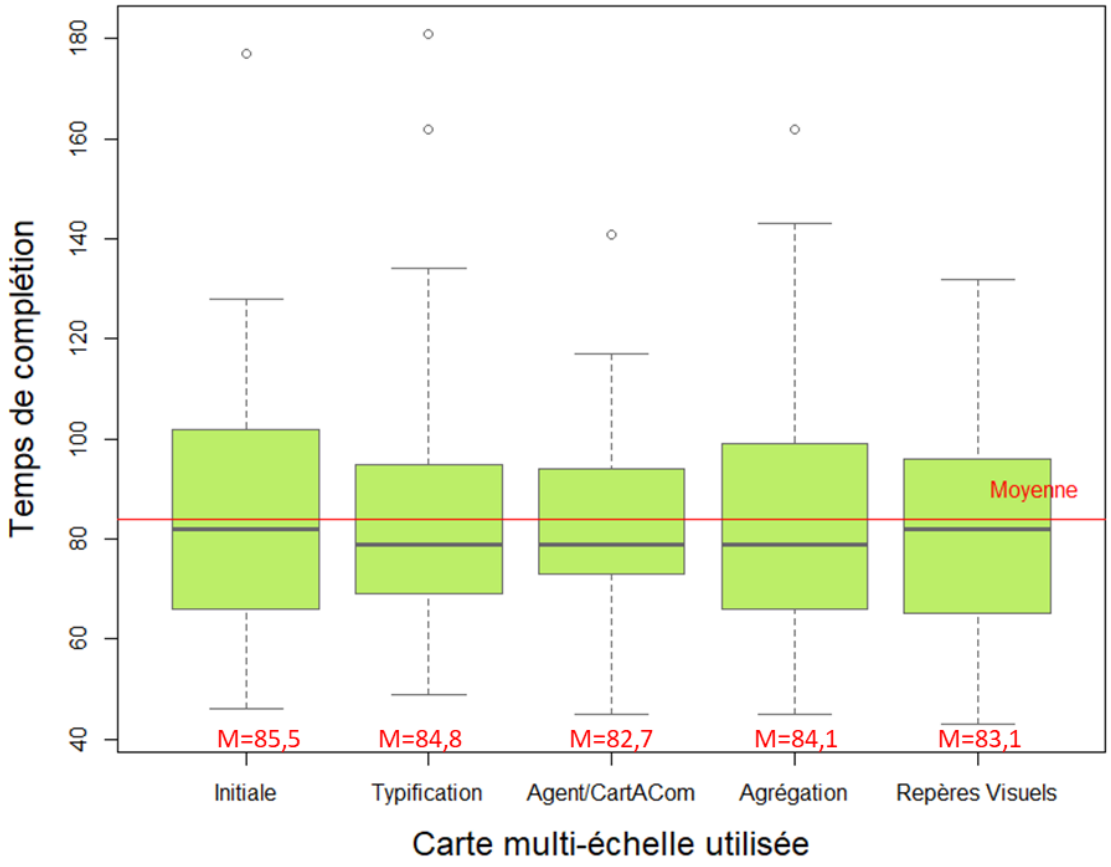


Figure 148. Répartition des temps de complétion observés par rapport à la pyramide utilisée. La moyenne de l'ensemble des essais du test est représentée en rouge.

Ici encore, le test de Shapiro-Wilk se révèle significatif (W = 0.94, *p-value* < 0.05) et la distribution ne suit donc pas une loi normale. La Figure 149 montre cette distribution du **temps de complétion** (à gauche). Les tests paramétriques étant plus robustes, il est parfois préférable de transformer ses données pour vérifier les conditions nécessaires et pouvoir appliquer une ANOVA. Nous choisissons ici de d'appliquer une **transformation logarithmique**, qui permet de gommer les valeurs extrêmes entourées à droite de la distribution (4 observations sur 225, entre 2min30 et 3min), que nous considérons non représentatives. D'après nos propres observations au cours du test, elles **révèlent plutôt un problème relatif à l'itinéraire ou à un agacement du participant**, que des difficultés dues à la pyramide utilisée. Nous obtenons ainsi une distribution normale qui passe le test de Shapiro-Wilk (W = 0.99, *p-value* = 0.47). Nous utilisons ensuite le test de Bartlett pour vérifier l'homogénéité des variances entre les groupes. L'hypothèse nulle de ce test est que les variances sont équivalentes. Le résultat est non significatif (chi^2= 1.80, *p-value* = 0.77), on ne peut donc pas rejeter l'hypothèse nulle et l'homogénéité des variances est confirmée.

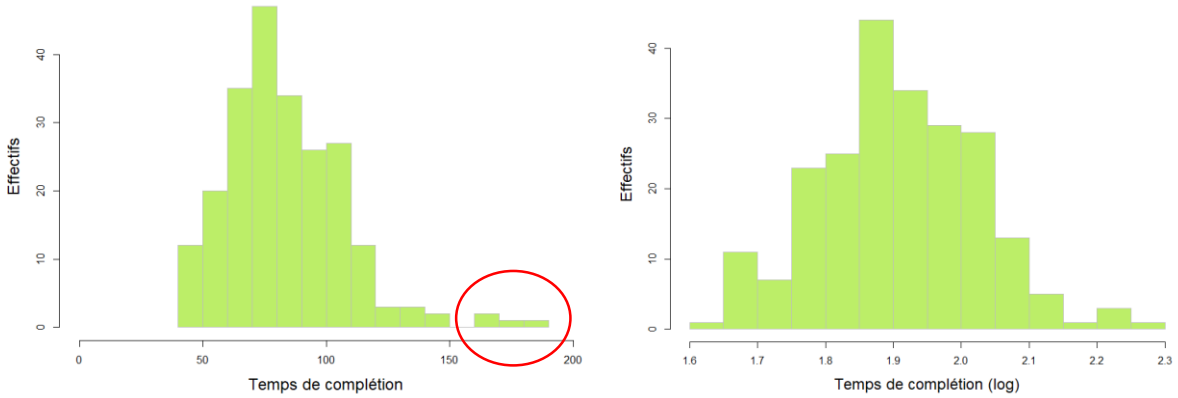


Figure 149. Distribution des échantillons pour la variable *temps* à gauche, à laquelle nous appliquons une transformation logarithmique pour obtenir une distribution normale à droite.

Nous appliquons donc une ANOVA à mesures répétées pour déterminer l'influence potentielle de la variable pyramide sur le temps de complétion de la tâche. L'hypothèse nulle de ce test est que les moyennes des groupes sont égales. Le résultat n'est pas significatif (F(2,56)=0.09, *p-value*=0.98) et nous ne pouvons rejeter l'hypothèse nulle. Aucune différence significative n'a donc été trouvée entre les groupes d'échantillons utilisant une pyramide différente, ni pour le pourcentage d'erreurs ni pour le temps de complétion de la tâche. Précisons ici que nous avons aussi isolé deux à deux les groupes d'échantillons pour comparer deux à deux les pyramides testées et pour évaluer nos hypothèses. Aucune différence significative n'est ressortie de ces comparaisons. **Nous ne pouvons donc pas évaluer nos hypothèses sur l'influence de la pyramide utilisée sur l'efficacité de l'utilisateur et la fluidité de navigation**. Pour mieux comprendre les raisons de cette non-significativité et évaluer la pertinence de notre test, nous étudions maintenant l'influence potentielle des autres variables de l'expérience.

E.5.2. Influence des Autres Variables sur la Réussite de la Tâche

Si l'on regarde maintenant la distribution des variables *temps* et *erreurs* en fonction de l'itinéraire utilisé, comme représentée respectivement par les Figure 150 et Figure 151, nous constatons que les groupes d'échantillons utilisant un itinéraire différent sont beaucoup plus hétérogènes que les groupes d'échantillons utilisant une pyramide différente, sur les Figure 147 et Figure 148. Ici, il semblerait donc que la variable *itinéraire* influence plus la réussite de la tâche que la variable *pyramide*, ce qui pourrait refléter une **complexité plus importante de ces itinéraires** et donc un biais dans notre expérience. Il nous semble donc important de vérifier l'influence potentielle de la variable *itinéraire* sur les variables *erreurs* et *temps*. Pour la variable *erreurs*, qui ne suit pas une distribution normale, nous utilisons un test de Friedman comme précédemment. Le résultat révèle des différences significatives entre les groupes utilisant un itinéraire différent (chi^2= 73.01, *p-value*<0.05). Pour caractériser ces différences significatives, nous utilisons un test post-hoc de Nemenyi, adapté aux distributions non normales, qui vise à identifier les groupes différents en effectuant des comparaisons multiples de leurs distributions. Le résultat **confirme une différence entre les itinéraires 10 et 19, qui semblent plus complexes que le reste des itinéraires.** Concernant le temps de complétion (en log toujours), une ANOVA à mesures répétées montre **une différence significative du temps de complétion en fonction de l'itinéraire utilisé** (F(14,195)=9.25, *p-value*<0.05). Ici nous

utilisons un test post-hoc de Tukey qui confirme l'influence des itinéraires 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 18 et 19 (*p-value*<0.05). Finalement, ces tests montrent qu'il existe une différence significative entre les groupes d'échantillons utilisant un itinéraire différent. **La réussite de la tâche est donc plutôt expliquée par l'itinéraire que par la pyramide utilisée.**

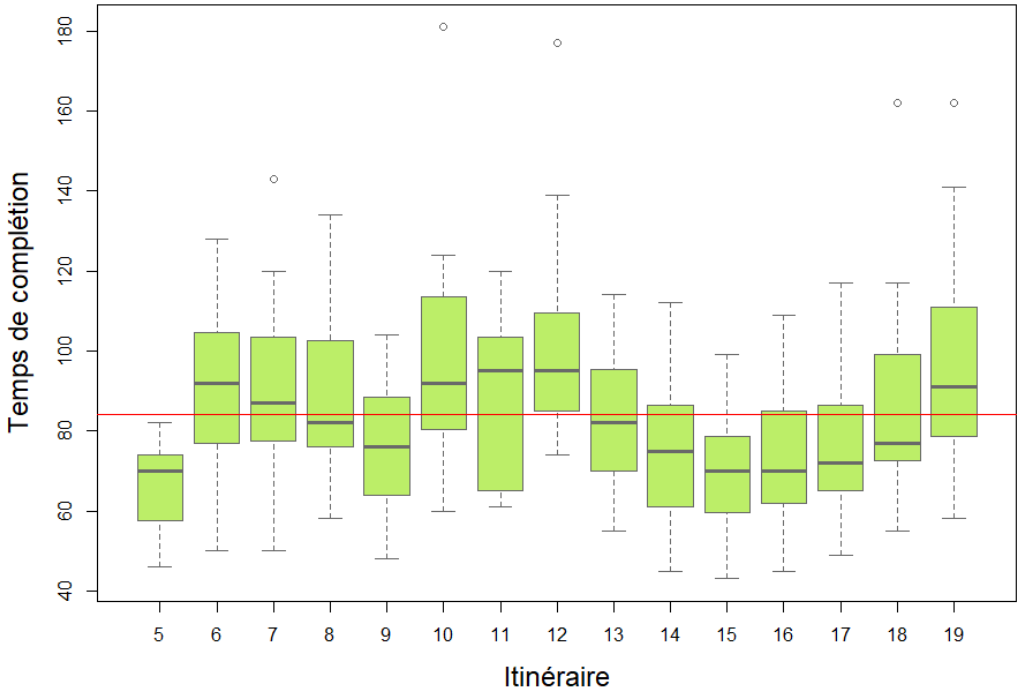


Figure 150. Distribution des temps de complétion observés par rapport à l'itinéraire utilisé. La moyenne de l'ensemble des essais du test est représentée en rouge.

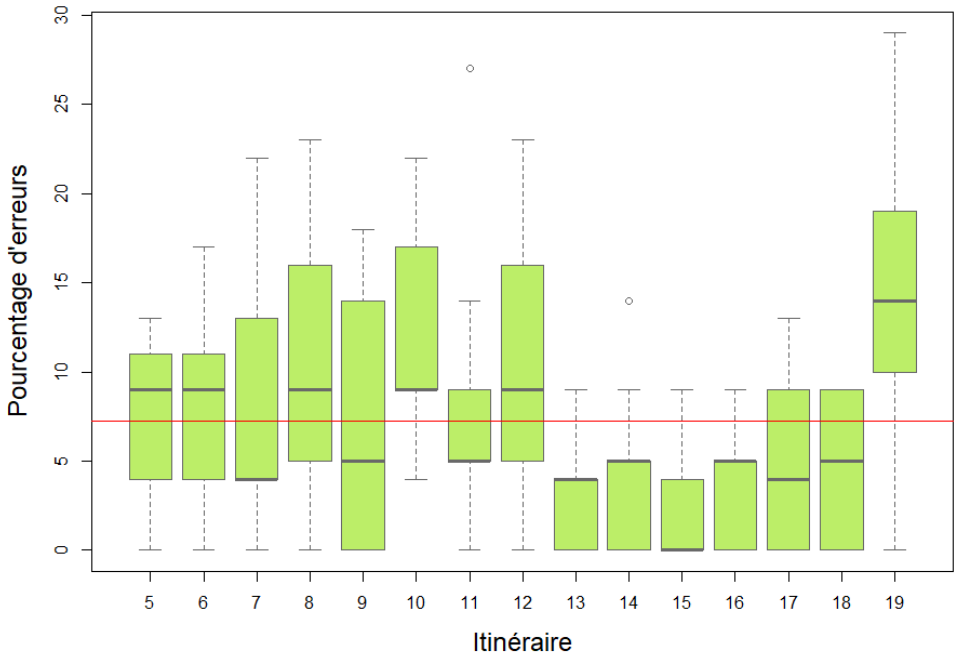


Figure 151. Distribution des pourcentages d'erreurs observés par rapport à l'itinéraire utilisé. La moyenne de l'ensemble des essais du test est représentée en rouge.

Ici nous avons observé à nouveau nos résultats **en dissociant deux groupes homogènes d'itinéraires**, en isolant les itinéraires détectés comme plus complexes par le test de Tukey. Ces deux groupes d'échantillons ont respectivement un temps d'exécution moyen de 72.8 sec et 91.5 sec. A l'échelle du temps moyen de réalisation de notre tâche (1min20), ces 20 secondes d'écarts ne sont pas négligeables. Ici, nous avons pensé à analyser l'effet de la variable pyramide dans ces deux groupes, plus homogènes en termes de complexité de l'itinéraire. Néanmoins, aucune différence significative n'a été trouvée pour la variable pyramide. Nous observons maintenant les valeurs extrêmes des variables *temps* et erreurs, **pour essayer de distinguer des conditions récurrentes et identifier des éléments potentiellement plus complexes.**

Si l'on regarde plus en détail la distribution des pourcentages d'erreurs commises au cours du test, illustrés par la Figure 152, on peut voir que 75% des essais du test comptent moins de 9% d'erreurs. Sur le panel d'itinéraires utilisés, cela représente 2 erreurs en moyenne, ce que **nous considérons relativement négligeable étant donné la complexité théorique de la tâche**. Pour identifier les variables susceptibles d'avoir biaisé notre expérience, nous regardons donc seulement les valeurs extrêmes de cette distribution, c'est-à-dire les **essais comptabilisant 3 erreurs ou plus**. Nous observons pour chaque pyramide, chaque itinéraire et chaque participant le nombre de fois où il apparait dans ces échantillons extrêmes. Le Tableau 7 reporte ce comptage pour les **56 essais (sur 225) à fort taux d'erreurs**. De la même manière, le Tableau 8 reporte les résultats pour les **51 essais les plus lents**, c'est-à-dire complétés entre 1min30 et 2min30 en écartant les valeurs aberrantes déjà mentionnées. Dans chacune des colonnes de ces deux tableaux, les valeurs les plus importantes sont mises en évidences en vert, indiquant respectivement les valeurs les plus susceptibles d'avoir influencé la variable mesurée erreur ou temps.

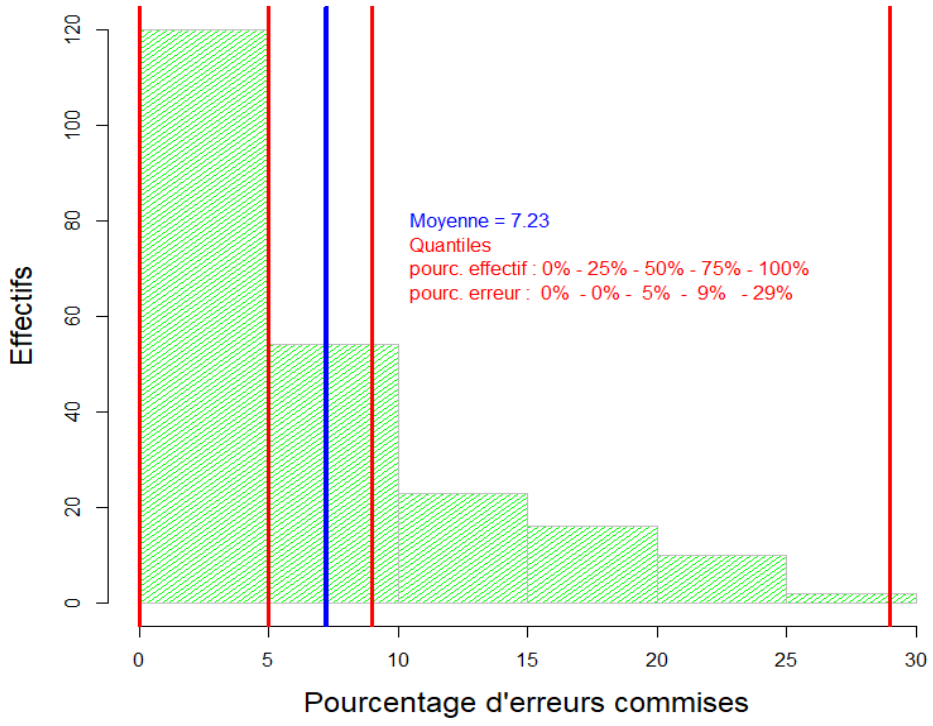


Figure 152. Distribution non normale des échantillons pour la variable *erreurs*. La ligne bleue représente la moyenne de la distribution (7.23) et les lignes rouges représentent les limites de quartiles de la distribution, c'est-à-dire les intervalles des groupes de 25% d'effectifs.

Pyramide	Échantillons	Itinéraire	Échantillons	Participant	Échantillons
Initiale	11	**5**	4	**1**	1
Typification	11	**6**	4	**2**	1
Agent/CartACom	13	**7**	6	**3**	6
Agrégation	11	**8**	5	**4**	5
Repères Visuels	10	**9**	5	**5**	9
		10	7	**6**	3
		11	3	**7**	2
		12	6	**8**	4
		13	0	**9**	5
		14	1	**10**	0
		15	0	**11**	5
		16	0	**12**	5
		17	2	**13**	5
		18	0	**14**	2
		19	13	**15**	3

Tableau 7. Fréquence d'apparition des pyramides, itinéraires et participants dans les échantillons à fort taux d'erreurs (supérieur à 9%). Les valeurs les plus importantes de chaque colonne sont mises en évidence en vert.

Pyramide	Échantillons	Itinéraire	Échantillons	Participant	Échantillons
Initiale	14	**5**	0	**1**	1
Typification	9	**6**	5	**2**	0
Agent/CartACom	8	**7**	6	**3**	6
Agrégation	11	**8**	5	**4**	5
Repères Visuels	9	**9**	2	**5**	0
		10	5	**6**	6
		11	5	**7**	10
		12	5	**8**	0
		13	3	**9**	4
		14	1	**10**	0
		15	1	**11**	6
		16	2	**12**	0
		17	2	**13**	5
		18	4	**14**	2
		19	5	**15**	6

Tableau 8. Fréquence d'apparition des pyramides, itinéraires et participants dans les échantillons à temps de complétion important (entre 1min30 et 2min30). Les valeurs les plus importantes de chaque colonne sont mises en évidence en vert.

Il est ici intéressant de noter qu'un participant en particulier a réalisé 3 erreurs ou plus sur près de deux tiers de son test (participant n°5, avec 9 essais sur 15 à 3 erreurs ou plus). En observant plus en détail ses résultats, en particulier le nombre de fois et le temps total où il a affiché l'itinéraire-source à chaque essai, nous avons conclu que nous étions ici en présence d'**un abus du facteur chance** : le participant a commis de nombreuses erreurs sans vérifier l'itinéraire-source, en espérant aller plus vite. Malgré notre présence et nos précautions, **il n'est donc pas évident que nos résultats soient toujours représentatifs d'une tâche de navigation multi-échelle.** Un autre participant ressort comme ayant réalisé des essais particulièrement lentement (participant n°7, 10 essais sur 15 à plus d'1min50). Dans notre cas en particulier, la variable sujet est prise en compte dans nos méthodes d'analyse (ANOVA à mesures répétées, Friedman) et son influence est isolée. L'hétérogénéité des performances entre participants n'est donc pas a priori un problème pour la significativité de nos résultats.

Par ailleurs, la **pyramide Agent/CartACom** ressort légèrement pour la variable erreur et **la pyramide Initiale** plus nettement pour la variable temps. Comme l'ont montré les analyses statistiques précédemment mentionnées, aucune différence significative n'existe entre les groupes d'échantillons utilisant une pyramide différente. **Néanmoins, on peut dire ici que les essais les lents ont été plus souvent réalisés avec la pyramide initiale.**

Le Tableau 7 indique aussi une fréquence importante des itinéraires 7, 10, 12 et 19 dans les essais à fort taux d'erreurs, ce qui est cohérent avec les résultats statistiques du test de Tukey.

Nous observons maintenant l'évolution globale des variables mesurées sur les graphiques de la Figure 153, comprenant le temps de complétion, le pourcentage d'erreurs, la quantité d'opérations de zoom, la quantité d'opérations de déplacement, le nombre de fois où l'itinéraire a été affiché et le temps total pendant lequel il a été affiché. Ici, il est intéressant de noter que toutes ces variables augmentent considérablement en fonction de l'avancement du test. Nous expliquons cette évolution d'après nos propres observations au cours de test et les retours des participants. D'une part, cette évolution peut s'expliquer par un **effet de fatigue ou de déconcentration**, qui implique une dégradation des performances de l'utilisateur en fin de session du test. D'autre part, l'accroissement des métriques de navigation peut s'expliquer aussi bien par des difficultés liées à cette fatigue, qu'à un changement de stratégie de réalisation de la tâche, avec une **prise de précautions et une application plus importante** en fin de test qu'en début. Certains participants nous ont malgré tout fait part de leur perception de gain d'aisance et d'expérience en fin de test, qui irait à l'encontre de cette dernière explication. Au lieu de l'influence de l'effet d'apprentissage que nous redoutions, c'est donc un effet de fatigue qui semble impacter principalement les performances de l'utilisateur. L'ensemble de ces observations montre donc finalement que **limiter la durée d'une session à 1 heure était justifié** et même peut-être insuffisant pour éviter l'effet de fatigue. Le mélange de l'ordre de présentation des pyramides au cours du test est donc aussi essentiel pour contrebalancer statistiquement l'influence de cet effet de fatigue. En revanche, les répétitions d'une même pyramide n'étant pas regroupées par bloc, il est assez difficile d'observer plus en détail l'influence de ces effets sur nos résultats et de **vérifier qu'ils soient bien contrebalancés par notre plan d'expérience**.

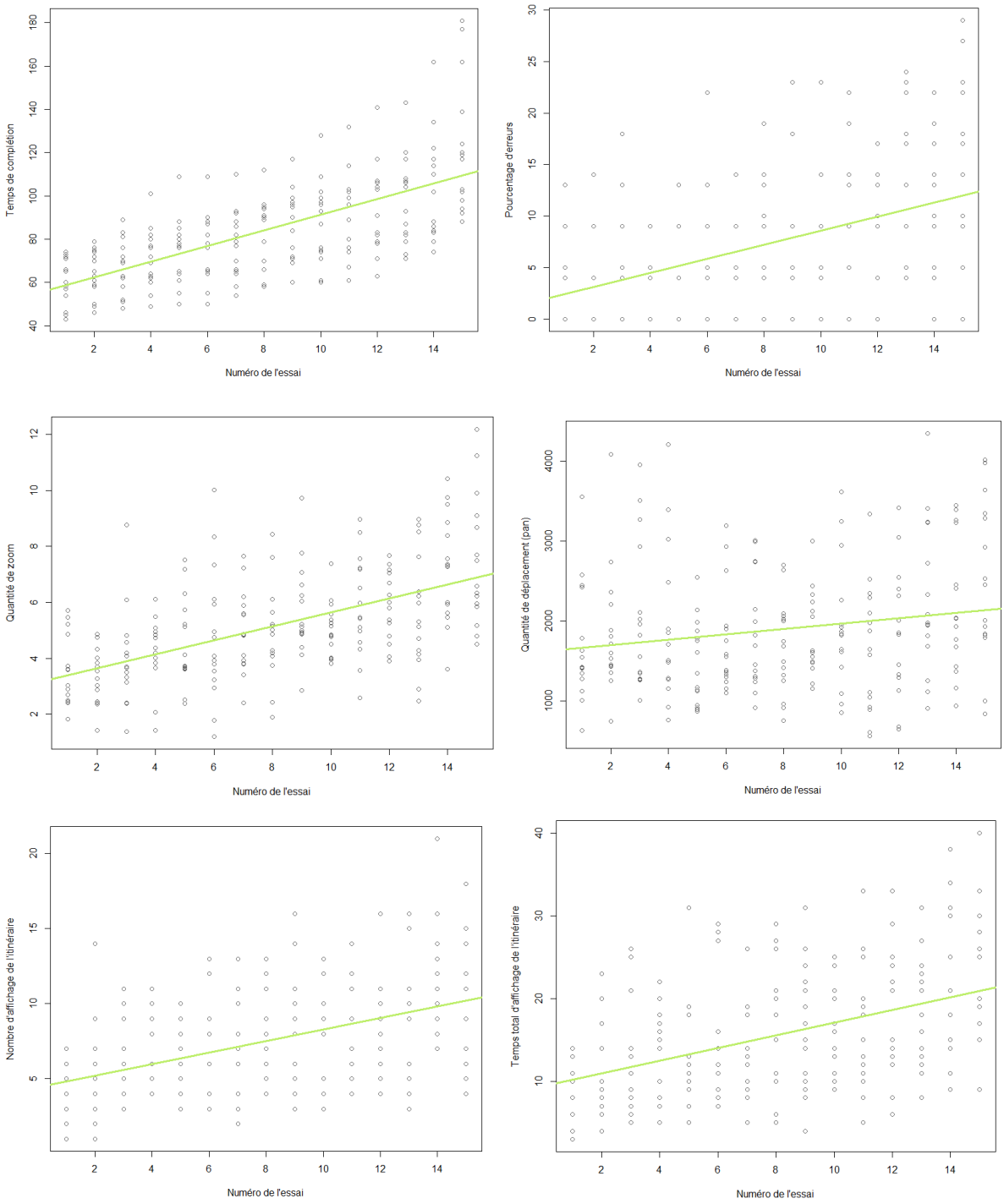


Figure 153. Evolution des variables mesurées en fonction du numéro de l'essai, c'est-à-dire de l'avancement du test, respectivement dans le sens de la lecture pour les variables temps, erreur, quantité de zoom, quantité de pan, nombre et temps d'affichage de l'itinéraire-source.

E.5.3. Analyse Qualitative des Métriques de Navigation et d'Affichage

Il est maintenant assez clair que nous ne pourrons tirer des conclusions sur la validité de nos hypothèses et l'apport de nos propositions d'amélioration à partir de ce test utilisateurs**, en partie à cause de la variation de complexité entre itinéraires**. Cependant, pour tout de même tirer parti de cette expérience et mieux comprendre ses écueils, nous observons maintenant plus en détail

l'évolution des métriques de navigation et d'affichage, c'est-à-dire des variables :

- ***quantitePan*** : quantité d'opérations de déplacement (pan) ;
- ***quantiteZoom*** : quantité d'opérations de zoom ;
- ***nbAffichageItineraire*** : nombre de fois où l'itinéraire-source a été affiché ;
- ***tpsAffichageItineraire*** : temps total où l'itinéraire-source a été affiché.

La Figure 154 représente les répartitions des mesures observées pour les métriques de navigation, c'est-à-dire les **quantités d'opération de déplacement (pan) et de zoom,** en fonction de la pyramide utilisée. Concernant les opérations de déplacement, les différences entre les groupes ne semblent pas significatives. Pour les opérations de zoom en revanche, on observe une petite différence entre les pyramides que nous avons produites et **la pyramide initiale, qui présente une plus grande dispersion et surtout plus d'opérations de zoom en moyenne**. Après application d'une transformation logarithmique pour les opérations de pan et racine carré pour les opérations de zoom, pour obtenir des distributions normales, nous avons utilisé une ANOVA à mesures répétées pour identifier l'influence de la pyramide utilisée sur ces métriques : **aucune différence significative n'a été montrée** (respectivement *p-value* = 0.96 et 0.09)**. Nous ne pouvons donc pas prouver que la pyramide utilisée influence la séquence d'opérations de navigation utilisée pour accomplir la tâche.**

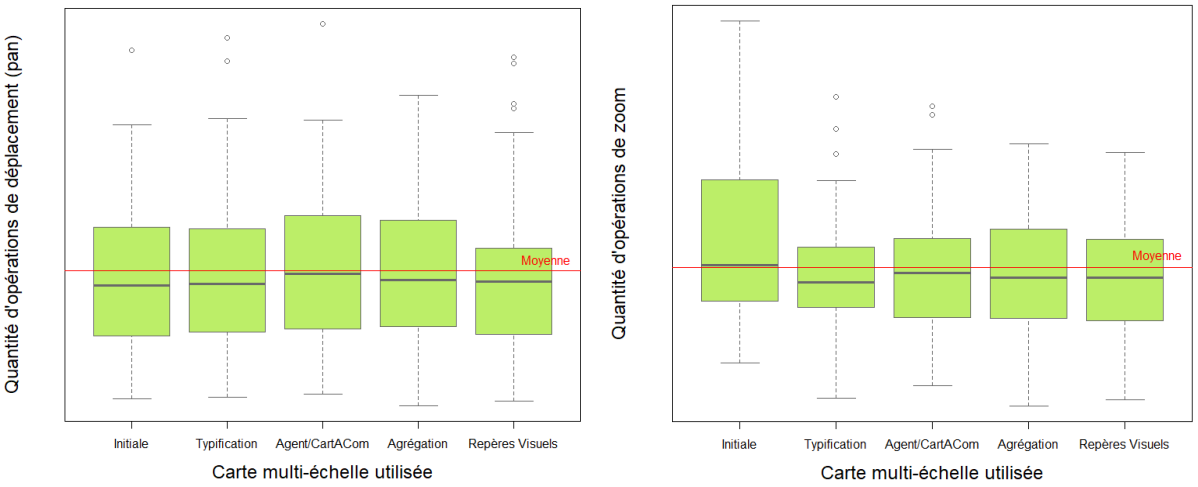


Figure 154. Répartition des quantités d'opérations de déplacement (pan) à gauche et de zoom à droite, observées en fonction de la pyramide utilisée. La moyenne de l'ensemble des essais du test est représentée en rouge.

Nous cherchons donc maintenant à identifier les facteurs susceptibles d'influencer cette séquence de navigation, à commencer par l'itinéraire utilisé. Une ANOVA à mesures répétées montre en effet que la **variable itinéraire a une influence significative sur la quantité d'opération de zoom** ($F(14,196)=6.65$, *p-value*<0.05) et un test post hoc de Tukey montre en particulier l'influence partielle des itinéraires 6, 7, 8, 10, 12, 18 et 19. De même, une **différence significative est trouvée sur la quantité d'opérations de déplacement** ($F(14,196)=5.73$, *p-value*<0.05), en particulier pour les itinéraires 6, 8, 9, 10 et 12.

Si l'on observe maintenant le nombre et le temps d'affichage de l'itinéraire-source en fonction de la pyramide utilisée, comme présentés dans la Figure 155, il semblerait que nos participants aient

tendance **à afficher l'itinéraire plus souvent avec la pyramide initiale**, mais pas forcément plus longtemps. Si l'on couple cette observation avec celle de la variable *quantiteZoom*, qui représente la quantité d'opérations de zoom réalisée, ce serait cohérent avec notre théorie initiale : l'utilisateur doit théoriquement réaliser plus d'opérations de zoom pour exécuter une même tâche multi-échelle, la pyramide initiale ayant moins de représentations intermédiaires. Cependant ici encore, **aucune différence significative n'a été trouvée par le test de Friedman** ($chi^2 = 2.28$, *p-value* = 0.68) pour la variable *tpsAffichageItineraire***.**

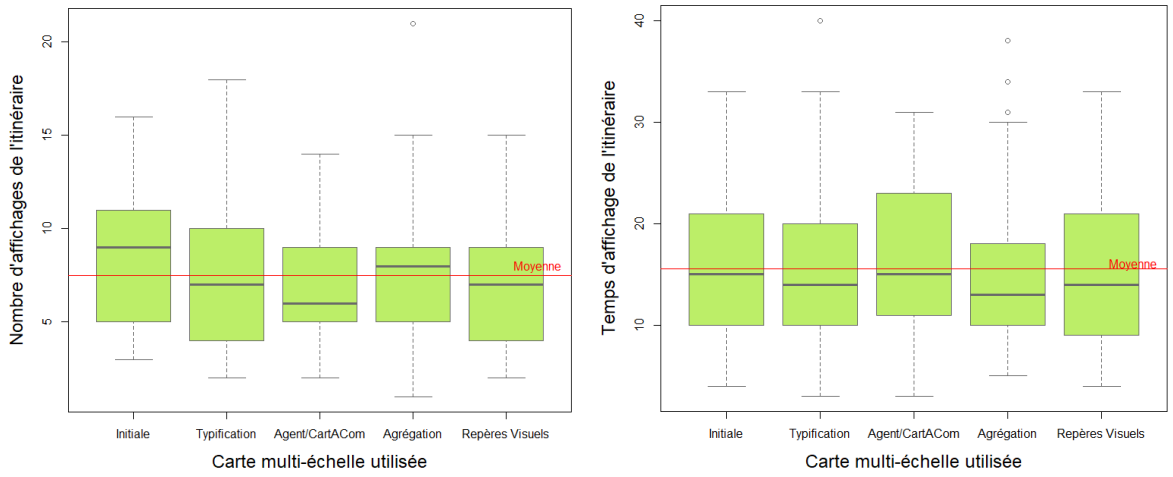


Figure 155. Répartition du nombre et du temps d'affichage de l'itinéraire-source, observés en fonction de la pyramide utilisée. La moyenne de l'ensemble des essais du test est représentée en rouge.

En revanche, le test de Friedman détecte une **différence significative concernant l'itinéraire utilisé** ($chi^2 = 58.41$, *p-value* <0.05) et le test post-hoc de Nemenyi identifie cette différence pour les itinéraires 5 et 15. En observant ces itinéraires, nous supposons qu'ils sont moins complexes que la moyenne.

Pour mieux comprendre cette variation de complexité entre les itinéraires, nous observons la Figure 156 représentant **les itinéraires les plus différents**, c'est-à-dire ceux dont la différence avec les autres itinéraires est significative sur le plus de variables observées. On retrouve donc ici les itinéraires 10 et 12 (en haut), statistiquement identifiés comme les plus complexes de notre panel, ainsi que les itinéraires 5 et 15 (en bas), statistiquement identifiés comme les plus simples. Les caractéristiques indiquées pour chaque itinéraire, à savoir la longueur à parcourir, le nombre de points-cibles à trouver et le nombre de virages (changement de direction à une intersection du réseau), **ne semblent pas expliquer la différence de complexité**. Sur la base de ces exemples, nous supposons ici que le **facteur principal de complexité relève du contexte urbain/rural de l'itinéraire**, le tissu urbain étant plus dense pour les itinéraires complexes. **L'emprise géographique de l'itinéraire**, c'est-à-dire la hauteur et largeur de son rectangle englobant, peut également expliquer cette complexité. En particulier, l'itinéraire 12 nous semble par ailleurs posséder des caractéristiques plutôt simples, mais a une emprise importante, qui nécessite plus d'opérations de navigation (déplacement notamment). **Appréhender son tracé et sa forme caractéristique dans son ensemble, mécanisme utile à la réalisation de notre tâche, peut donc être plus difficile pour l'utilisateur.**

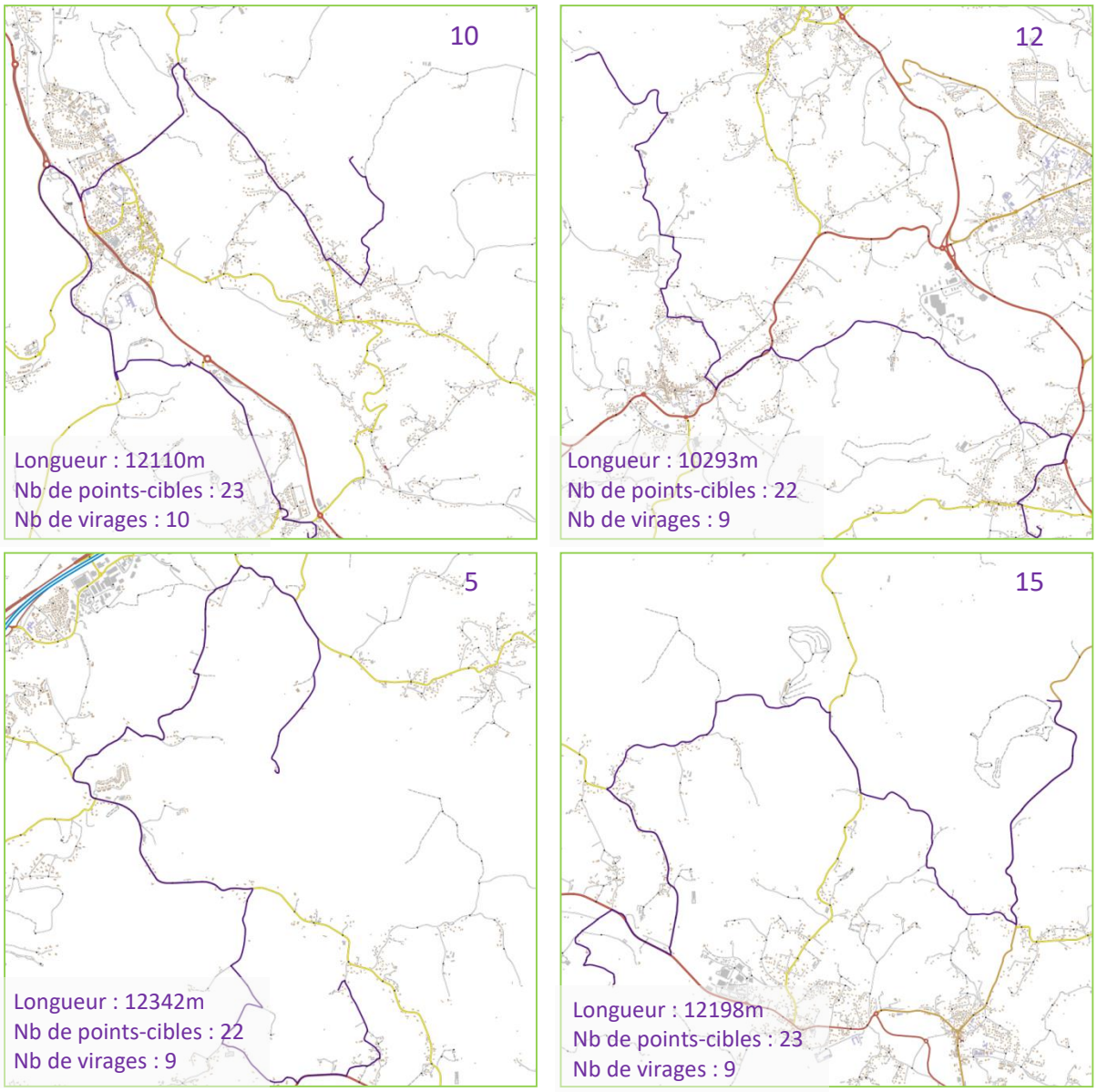


Figure 156. Illustration des itinéraires relativement complexe (en haut) 10 et 12, puis relativement simples (en bas) 5 et 15, les images étant prises à même échelle.

E.5.4. Analyse du Questionnaire Qualitatif

Les items du questionnaire qualitatif et la répartition des réponses de nos participants sont présentés dans la Figure 157. Ces questions visent à évaluer les variations de complexité perçues et mieux comprendre les mécanismes cognitifs de navigation multi-échelle. Pour faciliter la lecture du graphique, les items ont été ordonnés en fonction de leur thématique et non de l'ordre dans lequel ils étaient présentés aux participants. Notons que pour encourager les participants à réfléchir à leur réponse, nous avons volontairement inversé le sens de certaines phrases.

Nous avons inclus au questionnaire qualitatif la question *a* pour évaluer **la connaissance des utilisateurs de la zone d'étude de notre test**. Nous pensons en effet qu'un utilisateur familier de la zone pourrait avoir un comportement différent et éventuellement biaiser les résultats. La plupart des itinéraires utilisés n'empruntent pas le plus court chemin entre les points de départ et d'arrivée, pour respecter les contraintes de complexité que nous nous sommes fixées, ce qui peut sembler illogique

à un utilisateur familier de cet espace géographique et le perturber. Deux participants ont répondu avoir connaissance de la zone géographique. En revanche, ils n'ont pas fait mention à l'oral de l'utilisation de connaissances « terrain » pour réaliser le test. De plus, la formulation de la question est assez malheureuse, nous pouvons en effet dire que ces participants connaissent la zone, mais pas dans quelle mesure. **Nous estimons donc qu'il n'est pas pertinent de prendre ce facteur en compte ici.**

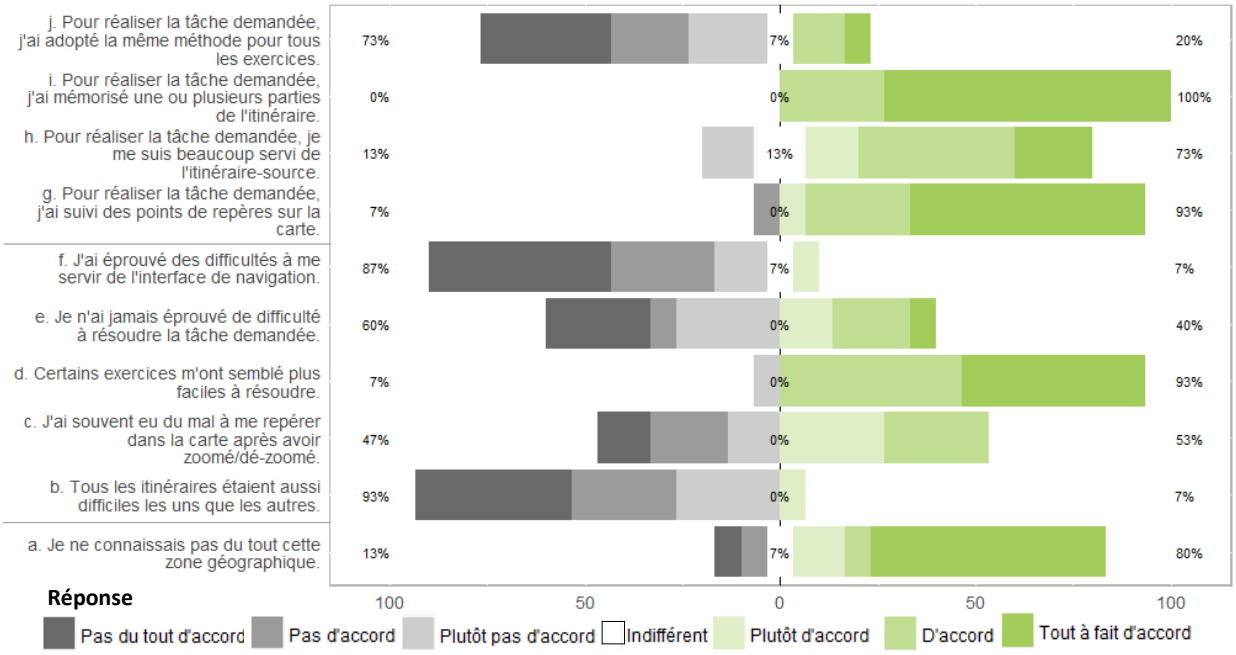


Figure 157. Répartition des réponses de nos participants au questionnaire qualitatif, basé sur une échelle de Likert à 7 niveaux de « *pas du tout d'accord* » à « *tout à fait d'accord* ».

La seconde partie du questionnaire évalue les **difficultés rencontrées par l'utilisateur** pendant la réalisation du test. Comme mentionné précédemment, puisque ce questionnaire est décorrélé des essais, nous ne pouvons réaliser ici une véritable évaluation subjective en demandant à l'utilisateur d'évaluer la difficulté perçue en fonction des conditions testées. Les questions portent donc sur le test dans sa globalité. Les réponses des participants à la question *f* montrent qu'ils n'ont **pas rencontré de difficultés à utiliser l'interface graphique**, ce que confirment nos observations du test. Les questions *b* et *d* **confirment aussi de manière très claire la perception de la variation de complexité au cours du test, relative à l'itinéraire**. Les questions *c* et *e* ont quant à elles vocation à valider la présence de difficultés perçues lors de la réalisation d'une tâche multi-échelle. Les résultats sont ici relativement partagés, laissant penser que certains participants n'ont rencontré aucune difficulté à réaliser notre test. Cela nous laisse penser que **notre tâche n'est peut-être pas suffisamment représentative des difficultés qu'un utilisateur peut rencontre**r face à une tâche de navigation multi-échelle. Néanmoins, la plupart des participants a clairement rencontré et verbalisé des difficultés lors du test. Nous pensons donc que la complexité de la tâche n'était pas trop insuffisante pour refléter un mécanisme de navigation multi-échelle réaliste.

La troisième partie du questionnaire vise à mieux comprendre le **mécanisme de navigation multi-échelle**, en interrogeant les participants sur les stratégies adoptées pour réaliser la tâche demandée. La question *j* évalue la constance des participants, en leur demandant s'ils ont utilisé une stratégie similaire au fil du test. Ici les réponses sont plutôt négatives. Le fait que le participant change de

stratégie au cours du test peut être un biais potentiel, car alors la comparaison de ses performances peut ne pas être pertinente. Néanmoins, si le participant adopte sa stratégie parce que certaines méthodes de résolution lui semblent plus appropriées en fonction de la pyramide utilisée, ces résultats nous intéressent et font état de la difficulté perçue. Ici, l'analyse de la variance en fonction de la pyramide a montré que ce n'était pas le cas. En pratique, l'observation des métriques a également montré que les participants **tendent plutôt à utiliser une technique constante au cours du test**. Enfin les questions *g*, *h* et *i* montrent que pour réaliser la tâche, les participants ont adopté une stratégie de mémorisation partielle de l'itinéraire-source, **tout en s'appuyant sur des points de repères pour naviguer dans la carte multi-échelle**.

Pour préciser cette question, nous avons demandé aux participants de lister les types de points de repères utilisés. Les réponses ont principalement cité des éléments visuels en rapport avec le réseau routier, comme la couleur des routes, les intersections majeures ou la forme géométrique de l'itinéraire. Les symboles ponctuels représentant les églises sont aussi beaucoup revenus, ce qui s'explique par leur saillance importante. Quelques participants citent d'autres éléments structurants de l'espace géographique et relativement saillants dans la carte, comme le réseau ferré ou le réseau hydrographique. Enfin, **un seul participant mentionne le tissu urbain**, en indiquant s'être appuyé sur les limites de la ville pour se repérer dans la carte. Cependant, il indique aussi que cette limite disparait à grande échelle, rendant son repère inutile. Nous pointons ici une limite majeure de notre tâche : elle s'appuie principalement sur le réseau routier et l'utilisation du tissu urbain n'est pas indispensable. **Nos participants ne se sont donc pas consciemment servis des représentations intermédiaires du bâti pour réaliser la tâche.** Or, c'est cette variable que nous souhaitons évaluer en particulier.

Enfin justement, nous avons souhaité savoir si nos participants étaient **conscients des variations du contenu cartographique** entre les différents essais, lorsqu'une pyramide différente était utilisée. Nous leur avons donc demandé s'ils avaient perçu des changements et si oui, combien de cartes multi-échelles ils pensaient avoir distinguées. Un seul participant a su prouver qu'il avait perçu un changement du contenu cartographique, en décrivant les changements perçus. De manière générale, les autres participants n'ont pas bien compris la définition d'une carte multi-échelle. De cette confusion, nous avons néanmoins pu analyser leurs perceptions de la navigation multi-échelle. **D'une part, de nombreux participants pensent percevoir un changement de représentation à chaque opération de zoom**, ce qui n'est pas forcément le cas s'ils restent dans le même intervalle d'affichage d'une représentation donnée. D'autre part, nous nous sommes aperçus que les participants n'avaient pas conscience de la proximité géographique entre les différents itinéraires et pensaient **avoir eu affaire à des zones géographiques différentes.** Rappelons ici que notre zone ne fait que 30km par 15km et que pour réaliser la tâche, les participants doivent beaucoup dézoomer et ont donc un aperçu global de la zone d'étude. De plus, seulement six toponymes sont présents sur la zone, il est donc assez courant que certains participants les mémorisent avant la fin du test. Nous concluons donc ici que les participants qui n'ont pas perçu la contiguïté de la zone d'étude ne se sont pas suffisamment appuyés sur le fond cartographique pour résoudre la tâche demandée, ce qui pose problème puisque c'est ce fond que l'on cherche à évaluer.

E.5.5. Discussion sur les Résultats et la Pertinence de notre Test Utilisateurs

Nous discutons dans cette partie les résultats et la pertinence de notre test utilisateurs, pour évaluer la fluidité de navigation d'une part, pour notre cas d'étude en particulier d'autre part. Concernant

nos résultats d'abord, nous n'avons pas pu montrer de différence significative entre les pyramides utilisées, ni sur les mesures de performances ni sur les métriques de navigation observées. Nos hypothèses restent à évaluer et la pertinence de notre proposition d'ajouter des représentations intermédiaires pour améliorer la fluidité de navigation reste à prouver. Néanmoins, les résultats tendent à montrer que les pyramides que nous avons construites avec des représentations intermédiaires semblent plus efficaces que la pyramide initiale. **De plus, les premières réactions que nous avons obtenues face à nos résultats, à la fois de cartographes et du grand public, tendent à valider notre proposition**. Ces premiers résultats nous encouragent donc à poursuivre nos efforts dans cette direction de recherche.

Les réponses qualitatives, les métriques de navigation et nos observations en tant qu'instructeur montrent que pour réaliser notre tâche de suivi d'itinéraire, il est nécessaire à la fois de naviguer entre les différentes représentations d'une carte multi-échelle et de s'appuyer sur les représentations intermédiaires pour se repérer dans la carte pendant ou après une opération de navigation. Notre tâche telle qu'elle est configurée est donc **représentative de tâches cartographiques multi-échelles** que nous espérions simuler. Nous sommes donc toujours convaincus qu'évaluer les performances d'un panel d'utilisateurs réalisant cette tâche permet d'estimer la fluidité de navigation dans la carte multi-échelle utilisée. Néanmoins, pour attester de cette corrélation, il faudrait aussi mener une expérience spécifique, en **comparant les performances mesurées aux résultats d'une évaluation subjective de la fluidité de navigation**.

Pour notre cas d'étude en particulier, il nous est apparu a posteriori que cette tâche n'était finalement pas adaptée à l'évaluation de l'influence des transitions de représentation du bâti sur la fluidité de navigation, seul élément variable dans notre matériel de test. En effet**, la complétion de notre tâche ne repose pas suffisamment sur la compréhension et l'utilisation des représentations intermédiaires du bâti**, que l'on cherche spécifiquement à évaluer. Pour mieux évaluer l'influence des représentations intermédiaires sur la fluidité de navigation avec cette même tâche, nous pourrions demander à l'utilisateur de sélectionner des éléments bâtis spéciaux à la place des points sur l'itinéraire. S'ils sont situés en périphérie des itinéraires-cibles, l'utilisateur devrait prendre en compte le voisinage des itinéraires et s'appuyer sur le contenu cartographique. S'ils ne sont pas mis en évidence par un point artificiel, mais seuls distincts par une symbolisation, utilisée par ailleurs dans la carte, l'utilisateur devrait s'appuyer sur la représentation bâtie. On peut par exemple imaginer de donner l'itinéraire-source comme dans notre tâche, et demander à l'utilisateur d'aller cliquer sur les bâtis spéciaux proches de son homologue à grande échelle (itinéraire-cible), sans le représenter cette fois. Ainsi, l'utilisateur devrait utiliser les représentations intermédiaires du bâti pour localiser l'itinéraire-cible (virtuel) et trouver les bâtiments à sélectionner.

Pour que l'utilisateur s'appuie sur ces représentations intermédiaires pour résoudre la tâche, nous pourrions également **faire en sorte qu'il soit plus conscient de leur intérêt et de leur variation entre les pyramides étudiées**. Nous pourrions ici revenir à un ordonnancement des essais par bloc, en réalisant au début de chaque bloc un entrainement en incitant l'utilisateur à utiliser les spécificités de chaque pyramide pour résoudre la tâche, comme les repères visuels. Nous pourrions ainsi introduire une véritable évaluation subjective dans notre test, visant à **évaluer la fluidité de navigation et les difficultés perçues par l'utilisateur à chaque essai.** Nous considérons ici que contrairement à l'utilisation d'une interface de navigation, qui vise généralement à être le plus intuitive possible, le processus de lecture cartographique passe par un apprentissage des codes de

représentation utilisés. Il ne serait donc **pas absurde d'instruire l'utilisateur sur les différences de représentations** avant de lui demander de les tester puis de les juger selon ses préférences d'utilisation. Notre objectif à long terme ici est aussi de mieux comprendre le processus cognitif qui régit la navigation cartographique multi-échelle et l'utilisation de cette évolution de représentation au fil des échelles. L'étude de la carte mentale multi-échelle que construit l'utilisateur pour résoudre une telle tâche de navigation cartographique est une piste de recherche intéressante ici. Il serait également très intéressant d'évaluer l'influence de nos propositions de transitions de représentation sur cette carte mentale, pour déterminer ce qui aide vraiment l'utilisateur.

Au-delà du mécanisme de la tâche qui n'est pas idéal pour notre cas d'étude en particulier, nous avons rencontré un biais majeur : la **variation de complexité des itinéraires utilisés**. L'identification et la pondération idéale des facteurs impliqués dans cette complexité demanderaient à elles-seules un test utilisateurs pour être déterminées. De plus, les valeurs ainsi identifiées dépendraient alors certainement des représentations graphiques utilisées et ne seraient pas généralisables à d'autres cas d'application. Pour produire des itinéraires de complexité équivalente, il aurait sans doute fallu créer des données artificielles, sur un jeu de données beaucoup plus important. Nous rencontrons ici certaines problématiques majeures de la conduite de tests utilisateurs contrôlés en cartographie. D'une part, il est courant en cartographie de vouloir évaluer une représentation cartographique en particulier sur un espace géographique spécifique. Il n'est donc parfois pas pertinent de réaliser ses tests sur des données artificielles, si les conclusions ne peuvent être généralisées ensuite. D'autre part, produire des jeux de données cartographiques est relativement plus coûteux que les jeux tests des expériences en IHM, spécifiquement s'ils sont généralisés. Produire le matériel de test nous a occupés durant un temps conséquent, et il aurait certainement fallu produire des zones plus importantes pour permettre une reproductibilité suffisante de la tâche. **Cet écueil reflète donc particulièrement la difficulté de notre étude, la fluidité de navigation dans une carte multi-échelle relevant à la fois des difficultés relatives à l'évolution de représentation cartographique et de mécanismes de navigation multi-échelle**.

Par ailleurs, si les évaluations subjectives sont habituellement préférées en cartographie, c'est aussi qu'elles permettent d'impliquer une population plus importante, avec plusieurs centaines de participants pour les enquêtes en ligne. **Les résultats de ces expériences sont alors d'autant plus généralisables et applicables à des profils d'utilisateurs variés, comme peuvent l'être ceux des utilisateurs d'une carte multi-échelle.** Mener un test contrôlé étant relativement coûteux et limité en termes de conditions testées, il pourrait être pertinent de mener au préalable une évaluation plus large pour réduire les champs des possibles. Nous pourrions ainsi évaluer les préférences des utilisateurs en termes d'évolution du contenu cartographique au fil des échelles, à travers des questions qualitatives et des mises en situation plus simples. Nous avons ainsi utilisé un extrait de notre test utilisateurs dans le cadre de communications scientifiques à destination du grand public ces derniers mois et avons constaté **une grande disparité des capacités de navigation multi-échelle**. Etonnamment, de jeunes enfants ont présenté une facilité déconcertante à utiliser les cartes multi-échelles et à se repérer entre les représentations intermédiaires, ce qui nous laisse finalement présumer de l'intuitivité de nos pyramides. D'autre part, les utilisateurs rencontrés dans ce contexte moins contrôlé ont exprimé plus facilement leurs difficultés relatives à la navigation multi-échelle, ce qui nous encourage à mener ce type d'évaluations qualitatives plus ouvertes au recueil de l'avis de l'utilisateur.

Forts de cette expérience, nous pouvons revenir sur notre plan d'expérience empirique. Ici, nous avons introduit un biais par la complexité variable des itinéraires, qui aurait peut-être pu être compensé par un nombre plus importants de participants ou un ordonnancement différent. Dans notre cas, nous avons mélangé toutes les conditions testées entre les participants, de manière à contrebalancer théoriquement les effets que nous ne pouvions pas contrôler comme la fatigue. A posteriori, cet ordonnancement nous empêche de discriminer l'influence des variables étudiées, car nous n'avons pas suffisamment d'échantillons testant les mêmes conditions. Ici, nous avons seulement trois échantillons testant le même couple itinéraire-pyramide, mais réalisés par des participants différents et à un moment différent du test. Nous considérons donc qu'un ordonnancement par blocs, un nombre de participants plus important et une tâche plus adaptée à la représentation du bâti seraient nécessaires a minima pour mener à bien notre test utilisateurs.

Enfin, nous concluons également de cette expérience que si de nombreux travaux présentant des tests utilisateurs sont publiés en cartographie, en sciences cognitives et en IHM, peu d'entre eux permettent une reproductibilité des procédures utilisées [Roth et al., 2017]. De plus, comme nous l'avons souligné à travers notre analyse des travaux existants, si les chercheurs de chaque communauté investissent de plus en plus les thématiques et les méthodes des autres communautés, **peu de travaux étudient des problématiques transverses, comme la fluidité de navigation dans une carte multi-échelle**. Nous appuyons donc la requête de [Saint-Marc et al., 2017 ; Roth et al., 2017] de partager un benchmark des procédures existantes, pour être mieux armés face à ces nouvelles questions de recherche.

En nous appuyant sur la littérature en cartographie, sciences cognitives et IHM, nous avons proposé un **protocole d'évaluation de la fluidité de navigation dans une carte multi-échelle**, à partir d'un test utilisateurs contrôlé. Nous avons modélisé une **tâche cartographique multi-échelle**, consistant à retrouver dans une carte détaillée un itinéraire donné à plus petite échelle, en naviguant entre les représentations disponibles. Nous proposons de mesurer la fluidité de navigation comme la **précision, la rapidité et la difficulté relative de la tâche**, estimée par des métriques de navigation.

Nous avons mené un test contrôlé basé sur ce protocole en faisant intervenir 15 participants. En plus de cette évaluation de performances, nous avons également réalisée une **évaluation qualitative, visant à mieux appréhender le processus cognitif de navigation multi-échelle**. Cependant, les conclusions de cette expérience sont assez limitées. D'une part, les itinéraires utilisés étant de complexité différente malgré nos précautions, les résultats sont principalement influencés par cette variable. **Développer des métriques de complexité des objets cibles des tâches utilisées** nous semble donc nécessaire pour garantir la significativité des tests utilisateurs contrôlés en cartographie. D'autre part, si la tâche permet a priori de simuler une tâche de navigation cartographique multi-échelle, elle ne permet pas spécifiquement d'évaluer l'efficacité de la représentation multi-échelle du bâti. Enfin, notre plan d'expérience, s'il permet de contrebalancer l'effet de fatigue subi par les participants, ne permet pas de discriminer les variables influençant la fluidité de navigation et la difficulté perçue. **Revoir l'ordonnancement des conditions en blocs permettrait d'introduire une évaluation subjective et de multiplier les échantillons comparables.**

Les premiers résultats que nous avons obtenus avec cette expérience tendent néanmoins à appuyer notre proposition d'amélioration des cartes multi-échelles par l'ajout de représentations intermédiaires et **nous encourage à poursuivre nos recherches en ce sens**.

Conclusion et Perspectives

A. Objectifs et Démarche Adoptée

Cette thèse avait pour objectif de proposer des méthodes pour **améliorer la fluidité de navigation dans les cartes multi-échelles**, que nous supposions liée entre autres à la cohérence et la progressivité de l'évolution de contenu cartographique au fil des échelles. Pour cela, nous proposions **d'ajouter des représentations intermédiaires** produites par généralisation cartographique, pour mieux maitriser cette évolution de contenu au fil des échelles et limiter l'impact des changements d'abstraction inévitables sur la navigation de l'utilisateur.

Pour remplir cet objectif, nous avons donc dans un premier temps identifié les facteurs susceptibles d'influencer la fluidité de navigation dans une carte multi-échelle. Puis, nous avons formalisé le concept de représentation intermédiaire et formulé des hypothèses sur l'influence potentielle des variables de construction sur la fluidité de navigation. Pour évaluer nos hypothèses, nous avons produit des transitions alternatives pour la représentation multi-échelle du bâti, en ajoutant trois représentations intermédiaires entre les cartes Scan Express définies au 1 : 25k et au 1 : 100k. Puis, nous avons mené un test utilisateurs contrôlé, en proposant une tâche et un protocole de test permettant d'estimer la fluidité de navigation dans une carte multi-échelle.

B. Contributions

1. Production de connaissances sur les cartes-multi échelles existantes

Une première contribution de notre thèse est **la production de connaissances sur les cartes multi-échelles existantes**, basée sur l'étude de 16 pyramides. La genèse des cartes multi-échelles a été conditionnée par l'évolution très rapide des technologies web et de visualisation interactive. Les producteurs cartographiques ont ainsi souvent produit leur pyramide comme une suite de cartes existantes, sans nouvelle réflexion quant au rendu multi-échelle. En termes de contenu, la production de carte multi-échelle n'est donc pas régie pour le moment par des méthodes éprouvées et validées. Étudier l'existant nous a permis de formaliser des premières connaissances théoriques, en distinguant ce qui fonctionne, donc les bonnes pratiques à adopter, et ce qui fonctionne moins et que l'on pourrait améliorer.

Un premier volet de cette analyse nous a permis de **vérifier l'application du standard WMTS** dans les géoportails étudiés, à quelques approximations près, dues notamment au changement de système de projection. Nous avons constaté que la plage de niveaux de zoom et d'échelles d'affichage utilisés dépend de l'étendue géographique du pays concerné. Néanmoins, les 16 pyramides étudiées utilisent toutes la plage d'échelles allant du 1 : 10k au 1 : 1.5M, sur laquelle une comparaison de leurs spécifications est donc possible. Par ailleurs, nous avons constaté dans 85% des géoportails étudiés qu'un niveau de zoom supplémentaire était ajouté autour de l'échelle d'affichage 1 : 1M, soulevant potentiellement un besoin de modification du standard WMTS.

Dans un second volet de cette analyse, nous avons étudié **l'évolution du contenu cartographique au fil des échelles**. Ayant constaté que de nombreux producteurs institutionnels utilisent une même carte à plusieurs niveaux de zoom consécutifs, nous avons étudié la relation existante entre l'échelle de symbolisation de ces cartes et les échelles auxquelles elles étaient affichées. Nous avons ainsi déterminé qu'en moyenne, l'échelle d'affichage était équivalente au double de l'échelle de symbolisation : une carte définie au 1 : 100k est généralement affichée autour du 1 : 50k. **Nous encourageons le respect de cette relation pour la construction de pyramides multi-échelles à partir**

de cartes existantes, car elle semble prévenir les problèmes d'adaptation à l'échelle (lisibilité, simplification) et est justifiée par la différence d'acuité visuelle de l'être humain entre les supports papier et écran. A travers cette étude, nous avons également confirmé qu'il n'existait pas de consensus entre les producteurs sur la simplification du contenu cartographique à une échelle d'affichage donnée. En étudiant plus précisément la simplification des thèmes du bâti et du routier, nous avons confirmé l'hétérogénéité de niveaux d'abstraction et de processus de généralisation utilisés à une échelle d'affichage donnée. Cette étude plus précise nous a permis de relever des transitions de représentation intéressantes au regard de la fluidité de navigation, notamment concernant **l'utilisation de représentations mixtes pour créer une transition plus progressive entre deux niveaux d'abstraction**.

Enfin, dans un troisième volet, nous avons étudié **l'évolution de la complexité visuelle du contenu cartographique au fil des échelles**, à l'aide de mesures de clutter. Nous avons confirmé la cohérence des différences de clutter avec la variation de complexité visuelle que nous percevons dans les pyramides étudiées. Néanmoins, nous avons relevé des limites de ces méthodes, dues à leur sensibilité excessive à des éléments graphiques susceptibles d'aider l'utilisateur dans sa navigation, comme les toponymes. **Les mesures de clutter sont donc un indicateur intéressant pour signaler des problèmes potentiels en termes de fluidité de navigation, mais qu'il faut considérer avec précaution et croiser avec d'autres méthodes d'évaluation**. Dans les pyramides étudiées, nous avons montré que la courbe moyenne de l'évolution du clutter au fil des échelles prenait globalement une forme de courbe en cloche. Les mesures de clutter semblent ainsi systématiquement plus importantes aux moyennes échelles qu'aux petites et grandes échelles, avec une complexité maximale au niveau de zoom 12, correspondant dans le standard WMTS à l'échelle d'affichage du 1 : 50k. Cette étude montre donc que si l'on souhaite améliorer significativement la fluidité de navigation dans les cartes multi-échelles, c'est autour des moyennes échelles et en particulier du 1 : 50k qu'il serait utile de travailler. Par ailleurs, nous avons constaté que les pyramides qui présentaient des variations de clutter moins importantes nous semblaient personnellement proposer une navigation plus fluide. Nous considérons donc **qu'il faut chercher à minimiser ces variations de clutter dans une pyramide, pour améliorer sa fluidité**.

2. Amélioration de la fluidité de navigation dans les cartes multi-échelles

En ce qui concernant notre objectif principal, à savoir l'amélioration de la fluidité de navigation dans les cartes multi-échelles existantes, cette thèse apporte deux contributions principales. Dans un premier temps, nous avons identifié un certain nombre de facteurs qui provoquent potentiellement des difficultés de navigation multi-échelle. Bon nombre de ces facteurs peuvent être expliqués par la construction des pyramides comme des suites de cartes existantes, sans réflexion quant à l'homogénéité, la cohérence et la progressivité du rendu multi-échelle. Adopter une stratégie de production orientée multi-échelle permettrait ici d'éviter les hétérogénéités de symbolisation et les incohérences de contenu d'une part, et de contrôler d'autre part la cohérence et la progressivité de la simplification du contenu. En revanche, les changements de niveaux d'abstraction dus à la généralisation sont inévitables, car ils permettent de garantir la lisibilité et la compréhension du contenu cartographique au fil des échelles. **Nous considérons donc ce dernier facteur comme un axe de recherche et d'amélioration majeur de la fluidité de navigation**.

Notre deuxième contribution à ce sujet s'articule autour de la définition du concept de

représentation intermédiaire. A partir des facteurs de difficulté potentielle identifiés précédemment, nous définissons des règles de construction à respecter pour que ces représentations puissent faciliter la navigation multi-échelle, notamment **la cohérence et la progressivité de simplification du contenu cartographique au fil des échelles**. Ces représentations intermédiaires doivent permettre de créer une étape dans cette simplification, pour faciliter la compréhension de la simplification appliquée et limiter l'impact des changements de niveaux d'abstraction sur la navigation de l'utilisateur.

3. Verrous scientifiques et techniques de la production de représentations intermédiaires

En proposant ce concept de représentations intermédiaires, nous avons aussi cerné **les verrous scientifiques et techniques que soulève leur production**. Pour cela, nous avons listé les variables de construction des représentations intermédiaires qui sont selon nous susceptibles d'avoir une influence sur la fluidité de navigation, à savoir : **le nombre de représentations intermédiaires, la répartition de leurs intervalles d'affichage et la progressivité de la transition de représentation** qu'elles créent. Nous avons également abordé les difficultés relatives à la modélisation de leur processus de généralisation, notamment la définition du degré de généralisation en fonction de l'échelle d'affichage et la prise en compte des représentations existantes moins détaillées, pour assurer respectivement la progressivité et la cohérence du contenu au fil des échelles. Ici, nous avons proposé d'adopter une stratégie de production en échelle [Stoter 2005], pour assurer la cohérence entre les niveaux de zoom successifs, puis une correction a posteriori, des incohérences avec la représentation moins détaillée suivante en termes d'échelle. Ne disposant pas de connaissances solides sur la relation entre simplification du contenu et échelle d'affichage, nous avons adopté une démarche empirique pour paramétrer nos processus de généralisation.

Concernant la visualisation de nos résultats, nous sortons ici du cadre du standard WMTS et avons constaté que les systèmes de visualisation communément utilisés (OpenLayers, Leaflet) proposent de plus en plus de navigation multi-échelle fluide (zoom animé ou continu), mais ne permettent pas a priori d'ajouter de représentations intermédiaires en dehors des niveaux de zoom prédéfinis. **Nous avons donc utilisé une méthode de tuilage adaptée, ainsi qu'un système de visualisation plus souple, basé sur ZVTM.**

4. Implémentation : transitions de représentations alternatives pour le bâti

Nous avons implémenté ce concept de représentation intermédiaire pour créer **trois représentations entre les cartes définies au 1 : 25k et au 1 : 100k dans la pyramide Scan Express de l'IGN**. Nous nous sommes ainsi confrontés à la généralisation de représentations intermédiaires, notamment pour les thèmes du bâti, des réseaux de transport, de l'hydrographie et de la végétation. Nous avons globalement appliqué des processus relativement simples d'élimination des éléments les plus détaillés, progressive au fil des échelles. Pour le thème du routier en particulier, nous avons appliqué un algorithme plus complet proposé par [Touya 2010], qui préserve les tronçons routiers visuellement saillants et importants pour le réseau.

Pour le thème du bâti en particulier, nous avons proposé **quatre alternatives pour la transition existante entre les cartes Scan Express au 1 : 25k et au 1 : 100k, susceptibles selon nous d'améliorer la fluidité de navigation**. Pour la première pyramide ainsi construite, nous avons appliqué un processus de typification que nous avons implémenté d'après les travaux de [Burghardt

et Cecconi, 2007]. Puis nous avons proposé une pyramide construite à partir d'un processus de généralisation basé sur les modèles AGENT et CartACom, déjà implémentés au COGIT. Nous avons aussi proposé une pyramide construite sur une agrégation progressive en ilots urbains au fil des échelles. Enfin, nous avons construit une variante de cette dernière pyramide, en préservant une représentation fidèle de quelques repères visuels. Ces deux dernières pyramides ont été générées par des méthodes semi-automatiques pour des raisons de temps.

En produisant ces représentations intermédiaires, nous avons notamment constaté qu'il était souvent utile d'adapter leur contenu a posteriori, une fois toutes les représentations intermédiaires produites, pour améliorer la progressivité d'évolution au fil des échelles. Les temps d'exécution des processus de généralisation peuvent être relativement importants et il n'est pas possible de tester un nombre infini de paramétrages. Une solution moins coûteuse peut être ici d'adapter la taille des symboles seulement, pour l'adapter à l'échelle d'affichage visée en conservant les données généralisées telles quelles. Une autre solution peut être au contraire de changer l'échelle d'affichage finalement utilisée, pour qu'elle soit mieux adaptée à la simplification du contenu cartographique.

5. Évaluation de la fluidité de navigation dans une carte multi-échelle

Pour évaluer nos hypothèses sur l'influence des représentations intermédiaires sur la fluidité de navigation, nous avons mené **un test utilisateurs contrôlé**. Puisqu'il n'existait pas à notre connaissance de méthodes éprouvées permettant d'évaluer la navigation dans une carte multi-échelle, nous avons étudié plus globalement des travaux en cartographie, IHM et sciences cognitives, impliquant une représentation cartographique et/ou une navigation multi-échelle. Nous avons ainsi proposé **une tâche cartographique multi-échelle, basée sur le suivi d'un itinéraire entre deux représentations à différentes échelles**. Cette tâche demande à l'utilisateur de naviguer dans la carte en effectuant des opérations de zoom et de déplacement, tout en s'appuyant sur le contenu cartographique aux différentes échelles. Elle permet donc théoriquement **d'évaluer la fluidité de navigation dans une carte multi-échelle**. Cette tâche, ainsi que des méthodes d'évaluation des performances utilisateurs, ont été implémentées dans une interface graphique basée sur le système ZVTM. Nous avons également proposé et éprouvé un protocole de test basé sur cette tâche, qui ne s'est pas révélé concluant pour notre cas d'application en particulier.

C. Enseignements

1. Tests utilisateurs contrôlés en cartographie

Bien que les tests utilisateurs contrôlés soient de plus en plus souvent appliqués en cartographie, en IHM et en sciences cognitives, nous n'avons trouvé que peu d'exemples de protocoles ou de tâches basés simultanément sur une représentation cartographique complexe et un mécanisme de navigation multi-échelle. Gagner en connaissances sur la mise en place de tests utilisateurs contrôlés dans ce cas d'application reste donc un axe de recherche. Comme plusieurs travaux le mentionnaient encore récemment [Roth et al., 2017 ; Saint-Marc et al., 2017], la littérature dans notre domaine manque d'exemples éprouvés et suffisamment détaillés pour pouvoir être réutilisés ou adaptés à d'autres cas d'application. Ces travaux soulèvent également la difficulté de définir un protocole de test efficace, sans s'appuyer sur un exemple valide.

Dans notre cas, nous avons donc proposé une tâche et un protocole selon une démarche globalement empirique, dont la réelle pertinence ne pouvait être montrée que par l'expérience.

Nous constatons en particulier qu'utiliser une représentation cartographique complexe est une importante source de complication dans la mise en place de tels tests, car elle multiplie le nombre de biais potentiels. **Pour améliorer le contrôle des variables de l'expérience, il est nécessaire de maitriser et donc de produire ce matériel de test**. Néanmoins, cette production est coûteuse, ce qui peut impliquer certaines limites, concernant la faible reproductibilité de la tâche. Nous avons ainsi constaté la difficulté de définir suffisamment d'occurrences de notre tâche et avons introduit un biais dû à la complexité variable des itinéraires. Disposer de règles de construction éprouvées aurait été utile ici, pour garantir une difficulté constante entre ces objets. **De manière générale, il serait bénéfique à toute la communauté de partager ces règles de construction, ou bien des jeux d'exemples ayant déjà été validés.** Utiliser une représentation cartographique complexe peut également introduire d'autres biais, dus à la complexité visuelle ou à l'expérience de l'utilisateur en lecture de carte. Néanmoins, nous sommes convaincus ici que pour mieux comprendre le mécanisme de navigation cartographique multi-échelle dans sa globalité, **il est nécessaire de réaliser ces tests sur un produit cartographique de complexité réaliste.** Enfin, le protocole de test que nous avons mis en place a révélé certains problèmes.

D'une part, il n'a pas permis de contrebalancer le biais dû à la différence de complexité des itinéraires. Ici, à cause de notre ordonnancement mélangé, nous n'avons pas assez de répétitions des mêmes conditions pour écarter l'influence de chaque variable. Aucun utilisateur ne teste le même couple pyramide-itinéraire au même moment dans le test par exemple. Un nombre de participants plus important aurait sans doute permis de pouvoir mieux discerner ces différentes influences et de distinguer celle de la pyramide. Ici, il aurait fallu écarter encore d'autre hypothèses et pyramides testées, pour limiter les variables de l'expérience et pouvoir palier aux autres problèmes, dont la diversité des itinéraires. De cette expérience, nous tirons donc l'enseignement **qu'il est plus pertinent de réaliser plusieurs tests utilisateurs visant des problématiques plus réduites**.

D'autre part, cet ordonnancement mélangé ne nous a pas permis d'inclure d'évaluation subjective dans notre test utilisateurs, qui se serait révélé un bon indicateur complémentaire pour l'estimation de la fluidité de navigation. Finalement, **présenter les pyramides par blocs aurait également permis à l'utilisateur de mieux percevoir et utiliser les différences entre les pyramides**. Nous identifions ici une limite principale de notre approche. Nous avons considéré que la fluidité de navigation était basée sur des facteurs et mécanismes relativement intuitifs, mais avons amélioré nos pyramides grâce à des méthodes relativement transparentes pour des non-initiés. Ainsi, aucun de nos participants n'a vraiment distingué de pyramides différentes. Ici, il devient nécessaire de redéfinir notre objectif global : améliorer l'efficacité potentielle des pyramides multi-échelles, soit en supposant que l'utilisateur est conscient des éléments de représentation sur lesquels il peut s'appuyer et sait les utiliser, soit seulement d'après une utilisation intuitive.

D. Perspectives

1. Production de Représentation Intermédiaire

Dans cette thèse, la modélisation des processus de généralisation utilisés pour produire les représentations intermédiaires est relativement empirique. Pour obtenir un résultat adapté à une échelle donnée, nous avons exécuté plusieurs fois chaque algorithme avec différents paramétrages. Le paramétrage est finalement choisi lorsque le résultat nous semble adapté, en le visualisant à l'échelle d'affichage visée. Ici, il serait nécessaire d'une part de mieux connaitre la relation entre le

paramétrage des algorithmes utilisés et la force de simplification du contenu cartographique souhaitée, pour pouvoir définir automatiquement ce paramétrage. D'autre part, il faudrait gagner en connaissances sur la relation entre l'échelle d'affichage et la simplification du contenu cartographique attendue. Pour cela, nous pourrions proposer un test utilisateurs à l'image de [Hoarau 2015], en demandant aux participants d'associer un contenu cartographique à la plage d'échelles d'affichage qui lui semble la plus adaptée pour le visualiser, ou à l'inverse, de choisir parmi plusieurs représentations à différent niveau de détail, celle dont la simplification lui semble la plus adaptée pour une plage d'échelles donnée. **Connaitre ces relations permettrait d'automatiser les processus de généralisation en fonction de l'échelle d'affichage visée, donc d'accélérer considérablement la production de représentations intermédiaires**. Utiliser un système d'orchestration multi-échelle, qui contrôle les processus et paramétrages à utiliser sur toute une plage d'échelles, à l'image du ScaleMaster [Brewer et Buttenfield, 2007 ; Touya et Girres, 2013], permettrait également de gagner en souplesse de production. Nous pourrions alors aborder des problématiques de recherche qui demande de produire de nombreuses représentations intermédiaires, comme la question de l'influence du nombre de représentations sur la fluidité de navigation.

Par ailleurs, les processus de généralisation que nous avons utilisés ici sont relativement limités. Pour les thèmes invariants, nous pourrions gagner en qualité cartographique **en utilisant d'autres opérations progressives (agrégation, simplification, déplacement) en plus de la sélection**. La géométrie des objets sur la carte au 1 : 100k étant fortement simplifiée, des opérations de simplification progressive de l'ensemble du réseau routier avec des opérations de morphing pourraient être intéressantes. Des opérations de généralisation continue, que nous avions volontairement écartées de nos travaux, permettraient aussi d'améliorer la progressivité d'évolution de la simplification au fil des échelles entre les changements de niveaux d'abstraction, et donc la fluidité de navigation. Nous pourrions aussi envisager d'utiliser des opérations de transformation de la symbolisation des données [Samsonov et al., 2013], pour créer une transformation plus continue entre les cartes existantes.

Enfin, il est clair que connaitre les représentations moins détaillées d'un objet à généraliser permettrait d'améliorer la cohérence et la progressivité de son évolution au fil des échelles. Cela permettrait aussi d'optimiser nos processus de production car aucun traitement ne serait plus fait inutilement. **Adapter nos processus de généralisation pour la prise en compte d'une base de données multi-échelles, stockant les relations entre les représentations d'un même objet à différentes échelles**, est donc également une piste d'amélioration de nos travaux. Ces méthodes seraient particulièrement utiles dans le contexte que nous avons abordé dans cette thèse, à savoir la production de représentations intermédiaires entre deux cartes connues d'une pyramide existante. Elles seraient aussi utiles dans un contexte de production d'une pyramide multi-échelle, sans représentation existante, mais où l'on dispose de plusieurs bases de données sources à différentes échelles. Dans ce cas, on souhaiterait en effet que les représentations intermédiaires généralisées à partir de la base de données la plus détaillée soient cohérentes avec la base de données disponible à plus petite échelle, à partir de laquelle seront dérivées les représentations intermédiaires suivantes.

2. Évaluation de la fluidité de navigation dans une carte multi-échelle

Le test utilisateurs que nous avons mené dans cette thèse ne nous a pas permis de conclure sur la

validité de nos hypothèses et donc sur l'influence des transitions de représentation sur la fluidité de navigation. Pour évaluer nos hypothèses, il est envisageable à court terme de réaliser un test utilisateurs contrôlé basé sur le même matériel, mais **avec une autre tâche mieux adaptée à l'évaluation de la représentation du bâti**. Nous pourrions aussi utiliser notre tâche actuelle pour évaluer l'influence de différentes transitions de représentation du réseau routier, après avoir produit le matériel de test adéquat. Nous pourrions par exemple comparer nos résultats actuels à une pyramide construite avec une évolution du niveau d'abstraction des routes au fil des échelles en représentation topographique, représentation topologique puis représentation ponctuelle. En ce qui concerne le protocole de test utilisé, il nous semble maintenant plus pertinent d'utiliser un ordonnancement par bloc, pour les raisons évoquées précédemment.

Il nous semble aussi très important de **mener des évaluations qualitatives en parallèle de ces mesures de performances, pour mieux comprendre les mécanismes cognitifs impliqués dans la navigation multi-échelle** et valider les facteurs de difficultés potentielles que nous avons personnellement identifiés. Une évaluation subjective de l'effort mental [Ziljstra 1993, pp. 47-104] ou un appareil de mesure du diamètre de la pupille [Kiefer et al., 2016] sont des pistes d'évaluation complémentaire envisageables pour estimer la charge cognitive relative à une tâche de navigation multi-échelle.

3. Amélioration de la fluidité de navigation dans une carte multi-échelle

Dans cette thèse, nous n'avons évalué que l'influence de la transition de représentation sur la fluidité de navigation dans une carte multi-échelle. Pour aller plus loin, il sera ensuite nécessaire d'évaluer **l'influence des autres variables de construction que nous avons identifiées, à savoir la répartition des intervalles d'échelles d'affichage et le nombre de représentations intermédiaires**. De plus, les facteurs que nous avons personnellement identifiés dans cette thèse comme susceptibles d'influencer la fluidité de navigation ne sont sans doute pas exhaustifs. Nous pourrions identifier d'autres facteurs en demandant à un panel d'utilisateurs aux profils variés, de décrire les sources de difficulté ressentie en réalisant une tâche de navigation cartographique multi-échelle. Il faudrait également évaluer l'influence des variables que nous avons fixées dans notre test utilisateurs, concernant les méthodes d'interaction et les outils de visualisation de la carte multi-échelle. On peut en effet imaginer qu'une transition de représentation donnée soit plus ou moins adaptée à la taille de l'écran (smartphone, tablette, écran d'ordinateur, mur d'écran), à la méthode d'interaction (souris, tactile, gestes) ou au type d'outil de visualisation utilisé (zoom, loupe, sliders).

Par ailleurs, la pertinence de notre proposition d'ajouter des représentations intermédiaires pour améliorer la fluidité de navigation reste à prouver. Notre protocole de test ne nous a pas permis de démontrer l'amélioration apportée par rapport à la pyramide initiale. **Néanmoins les premières réactions que nous avons obtenues face à nos résultats, à la fois de cartographes et du grand public, tendent à valider notre proposition**. Il serait aussi intéressant de confronter une pyramide construite avec des représentations intermédiaires à la méthode du vario-scale [van Oosterom et al., 2014 ; Šuba et al., 2016] pour montrer l'amélioration éventuelle apportée.

Nos réflexions sur l'efficacité des représentations intermédiaires soulèvent d'autres questions plus générales sur l'utilisation d'une carte multi-échelle. Nous avons ici considéré que la navigation multi-échelle reposait sur des mécanismes cognitifs intuitifs, sans chercher à instruire nos participants ni des différentes pyramides ni de la meilleure façon de les utiliser. Il semble que nous ayons ici fait

l'amalgame entre l'efficacité et l'intuitivité d'utilisation d'une représentation cartographique. Pour notre test utilisateurs en particulier, **nous aurions certainement gagné en significativité si ces différences avaient été mises en valeur pour nos participants**. On peut penser ici que si de plus en plus de cartes multi-échelles proposent des transitions de représentation progressives, utilisant par exemple des repères visuels, les utilisateurs apprendront par expérience à s'en servir. Énoncer les différences entre les pyramides, pour que l'utilisateur s'appuie sur les caractéristiques de chacune, n'aurait donc théoriquement pas porté atteinte à la significativité de nos résultats.

Dans cette thèse, nous nous sommes cantonnés à l'amélioration de cartes multi-échelles existantes et avons rencontré de nombreux problèmes dus à l'utilisation de produits cartographiques non adaptés. Aujourd'hui, les producteurs institutionnels consacrent de plus en plus d'efforts et de ressources à leurs produits cartographiques numériques, en essayant de s'adapter le plus possible aux besoins variés des utilisateurs**. Il est donc assez vraisemblable que dans un avenir proche, la plupart des producteurs institutionnels adoptent un processus dédié à la production de carte multi-échelle.** Il sera alors possible de repenser globalement la simplification du contenu cartographique sur toute la plage d'échelles, sans se contraindre à intégrer les représentations existantes. C'est le cas de l'IGN, qui est en train de réfléchir à la construction d'une nouvelle pyramide écran, destinée à être diffusée au format vecteur tuilé. Dans cette configuration, la plupart de nos contributions sont tout de même pertinentes et applicables pour modéliser le processus de production multi-échelle. L'utilisation du format vecteur ouvre néanmoins de nouvelles pistes d'amélioration et d'utilisation de nos travaux, notamment pour l'adaptation aux besoins des utilisateurs.

4. Adaptation aux besoins des utilisateurs

Disposer d'une carte multi-échelle permet à l'utilisateur de réaliser des tâches cartographiques à différentes échelles. En pratique avec les systèmes de zoom continu, l'utilisateur peut choisir assez précisément l'échelle d'affichage la plus adaptée à son cas d'utilisation. En revanche, il ne peut pas choisir la simplification du contenu cartographique, qui pour le moment est fixée par le producteur en fonction de l'échelle d'affichage. **Pour aller plus loin dans la personnalisation de la représentation cartographique, on pourrait donc donner la main à l'utilisateur sur la simplification du contenu affiché**. En termes d'interactions, on peut ici imaginer un curseur à déplacer le long d'un axe représentant la force de généralisation appliquée, ou une opération plus proche de celle du zoom, avec la molette de la souris. La littérature en géovisualisation parle d'ailleurs de *content zooming*, pour distinguer cette simplification du contenu cartographique d'une opération de zoom graphique classique, qui agrandie la carte sans forcément la simplifier [Timpf et Devogele, 1997]. L'idée de base est donc de simplifier le contenu cartographique, tout en restant à emprise et échelle d'affichage constante. Cette méthode a notamment été proposée pour visualiser des données thématiques ponctuelles sur un écran de téléphone [Bereuter et al., 2012], car elle permet de pallier aux limites de taille de ce type d'écran. Dans ces travaux, seule la surcouche thématique subit le zoom sémantique et le fond de carte topographique demeure invariant. Il serait donc intéressant d'aller plus loin, **en proposant de faire varier le niveau d'abstraction de la carte en général, voire d'une sélection de thèmes cartographiques**. Cette variante pose de nouvelles problématiques en termes de généralisation et de conception multi-échelle. Si l'utilisateur fait varier la simplification d'une seule classe d'objets, des incohérences peuvent apparaitre avec le reste de la carte. Il faudra donc des méthodes pour adapter automatiquement le voisinage des objets modifiés, par un

processus de généralisation à la volée par exemple. Plus simplement, si l'on fait varier la simplification de l'ensemble du contenu cartographique, il est possible de pré-calculer différentes représentations, comme nous l'avons fait pour nos pyramides. Néanmoins, proposer un zoom sémantique dans une pyramide rastérisée peut être problématique, car la symbolisation ne pourra pas être adaptée à l'échelle d'affichage. Le rendu cartographique pourra alors être soit trop grossi, soit présenter des problèmes de lisibilité. Pour éviter cela, il faudrait diffuser ces pyramides dans un format plus dynamique, comme le vecteur tuilé.

Finalement, la navigation cartographique multi-échelle sera bientôt une navigation continue, à la fois en termes d'échelles d'affichage et de niveau d'abstraction. Cette idée de dimension continue s'applique désormais à plusieurs variables de construction cartographique, comme le réalisme [Hoarau 2015], le style [Ory et al., 2017], la projection [Jenny 2012] ou la perspective (2D-3D) [Semmo et al., 2012]. Cet élan montre bien la volonté des producteurs de répondre aux nouveaux besoins utilisateurs de visualiser, comparer et utiliser des représentations très hétérogènes. Il serait donc particulièrement intéressant ici de **chercher à coupler ces différentes dimensions cartographiques, en concevant une interface permettant de naviguer de manière continue entre des représentations hétérogènes,** à échelles différentes et utilisant un style différent par exemple. Ces pistes sont explorées dans le projet MapMuxing, avec notamment la production d'un continuum couplant nos résultats multi-échelles avec des travaux sur le réalisme [Hoarau 2015] et le style cartographique [Ory et al., 2017].

Annexes

Annexe A
Relevé des Echelles d'Affichage Utilisées

Dans le cadre de l'analyse des systèmes de visualisation des cartes multi-échelles étudiées, nous avons besoin de définir l'échelle d'affichage utilisée pour chaque niveau de zoom de chaque pyramide. Cette annexe détaille le protocole appliqué pour mesurer cette échelle et évalue sa pertinence.

1. Échelle d'Affichage Indiquée ou Mesurée

Bien que certaines applications (ACT-Luxembourg, OSI-Irlande, BEV-Autriche, GDI-Allemagne, Scan IGN-France), indiquent numériquement leur échelle d'affichage, comme dans la Figure 158, la plupart d'entre elles affichent simplement une barre d'échelle graphique.

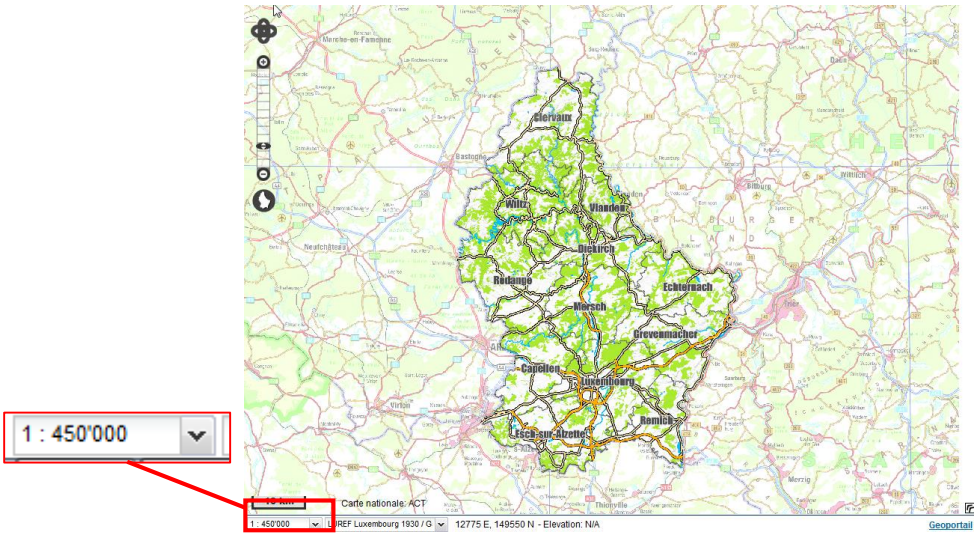


Figure 158. Echelle d'affichage indiquée numériquement sur le Géoportail de l'ACT-Luxembourg

Comme pour une carte papier, pour connaitre l'échelle d'affichage d'une carte numérique, on peut calculer le rapport entre la valeur et la taille de cette barre d'échelle, telles qu'illustrées par la Figure 159. Cependant, nous pensons que cette mesure peut varier en fonction de la taille et de la résolution d'écran. Pour vérifier la pertinence de cette mesure pour notre étude, nous avons donc estimé l'échelle d'affichage en mesurant la taille de la barre d'échelle pour chaque niveau de zoom de chaque pyramide, à la main avec une règle, puis avons évalué la variabilité de cette mesure en fonction de l'écran et sa cohérence en la comparant avec une distance terrain connue.

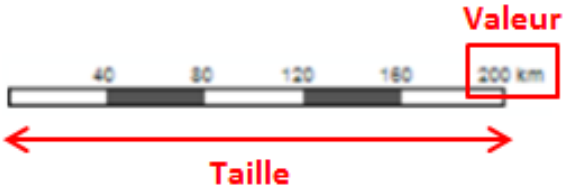


Figure 159. La valeur de la barre d'échelle sera la distance équivalente indiquée, tandis que sa taille sera sa longueur mesurée en centimètres ou en pixels.

2. Protocole de Mesure de l'Échelle d'Affichage

Pour cette analyse, nous avons utilisé deux écrans, ayant une taille et une résolution par défaut différente. Pour chaque écran, une deuxième résolution a également été testée.

- « Ecran DELL », taille : 19'', résolution par défaut : 1280*1024, résolutions testées : 800*600, 1280*1024
- « Ecran Lenovo », taille : 15,6'', résolution par défaut : 1920*1080, résolutions testées : 1280*1024, 1920*1080

Toutes les mesures ont été réalisées avec le même navigateur (Mozilla Firefox) pour éviter un biais, comme par exemple une adaptation différente du navigateur à la taille et la résolution d'écran. Pour chaque application, la barre d'échelle a été mesurée à un niveau de zoom constant. Par défaut, le niveau de zoom minimal a été utilisé, c'est-à-dire la plus petite échelle. Pour les applications montrant une grande emprise à zoom minimal (Google Maps, Bing Maps, OpenStreetMap, USGS-États-Unis) l'échelle n'est pas la même en tout point de la carte comme le montre la Figure 160, à cause des déformations de la projection. Dans ce cas, nous avons utilisé un niveau de zoom plus grand pour que la variation d'échelle soit négligeable en tout point de l'écran.

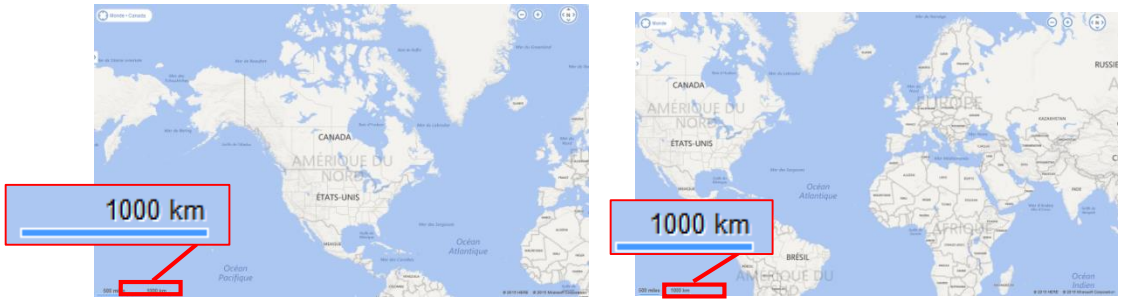


Figure 160. Au niveau de zoom minimal, la barre d'échelle a une taille variable, due aux déformations de la projection.

Deux séries de mesures ont été réalisées sur chacun des deux écrans, en faisant varier la résolution. Quatre séries de mesures ont donc été réalisées sur chaque application. Toutes les applications ont été inclues dans cette analyse, même celles qui indiquent numériquement leur échelle d'affichage.

3. Résultats de la Mesure Manuelle de la Barre d'Échelle (en cm)

Le Tableau 9 présente les échelles d'affichage calculées à partir des mesures manuelles de la barre d'échelle, selon le protocole précédemment expliqué. Excepté pour le géoportail de BEV Autriche, les résultats montrent que **l'échelle d'affichage varie systématiquement et parfois de manière importante**, si l'on change de résolution ou de taille d'écran. Considérant l'exception de la pyramide du BEV Autriche, nous constatons dans le Tableau 10 que la **valeur de la barre d'échelle change d'une résolution à l'autre** sur l'écran Lenovo. Il semblerait donc que pour cette application, la barre d'échelle s'adapte, ce qui assure ici la cohérence de l'échelle mesurée. Cependant, toutes les autres applications montrent une même barre d'échelle constante, quels que soient les caractéristiques de l'écran. Nous devons donc vérifier que ces barres d'échelles, qui ne semblent pas s'adapter aux caractéristiques de l'écran, mais dont la taille varie visuellement, restent cohérentes avec l'échelle d'affichage effective de la carte.

Applications	Ecran DELL		Ecran Lenovo	
	800*600	1280*1024	1280*1024	1920*1080
ACT Luxembourg	1 : 952381	1 : 1538462	1 : 1333333	1 : 2000000
BEV Autriche	1 : 1744186	1 : 2777778	1 : 2941176	1 : 2941176
Bing Maps	1 : 3333	1 : 5556	1 : 4762	1 : 7143
Google Maps	1 : 26316	1 : 43478	1 : 37037	1 : 58824
ICGC Catalogne	1 : 1111111	1 : 1818182	1 : 1666667	1 : 2500000
IGN Espagne	1 : 8771930	1 : 14084507	1 : 15384615	1 : 23255814
Lantmäteriet Suède	1 : 8333333	1 : 13333333	1 : 11764706	1 : 18181818
NGI Belgique	1 : 2272727	1 : 3571429	1 : 3125000	1 : 4761905
NLS Finlande	1 : 4357447	1 : 7062069	1 : 6206061	1 : 9309091
OpenStreetMap	1 : 425532	1 : 689655	1 : 588235	1 : 909091
Scan IGN	1 : 26316	1 : 41667	1 : 45455	1 : 71429
Scan Express France	1 : 3571428	1 : 5714285	1 : 5000000	1 : 7692308
Swisstopo Suisse	1 : 1388889	1 : 2272727	1 : 2000000	1 : 3125000
USGS Etats-Unis	1 : 250000000	1 : 294117647	1 : 227272727	1 : 333333333

Tableau 9. Echelles d'affichage calculées à partir des mesures manuelles de la barre d'échelle

BEV-Autriche	Ecran DELL		Ecran Lenovo	
	800*600	1280*1024	1280*1024	1920*1080
Echelle d'affichage calculée	1 : 1744186	1 : 2777778	1 : 2941176	1 : 2941176
Valeur de la barre d'échelle	150 km	150 km	150 km	100 km

Tableau 10. Variations de l'échelle d'affichage et de la valeur de la barre d'échelle pour la pyramide BEV Autriche.

Applications	Distance réf (km)	Distance terrain équivalente à la mesure sur la carte				Ecart-type	Variation (%)
		Ecran DELL		Ecran Lenovo			
		800*600	1280*1024	1280*1024	1920*1080		
ACT Luxembourg	58	52,38	52,31	48,00	52,00	3,56	6
BEV Autriche	137,3	116,86	138,89	132,35	138,24	9,23	7
Bing Maps	1,2	1,22	1,22	1,10	1,20	0,05	4
Google Maps	1,81	1,79	1,83	1,63	1,88	0,09	5
ICGC Catalogne	83,6	78,89	80,00	81,67	85,00	2,51	3
IGN Espagne	1208,4	1219,30	1225,35	1138,46	1209,30	35,21	3
Lantmäteriet Suède	1027,6	1008,33	973,33	823,53	1018,18	84,52	8
NGI Belgique	281,9	288,64	282,14	275,00	285,71	5,11	2
NLS Finlande	154	152,51	155,37	148,95	148,95	2,93	2
OpenStreetMap	12	11,91	11,72	11,76	11,82	0,11	1
Scan Express France	398,8	417,86	400,00	315,00	407,69	41,44	10
Scan IGN	2,1	2,11	2,04	1,95	2,14	0,07	3
Swisstopo Suisse	77,7	80,56	81,82	72,00	81,25	4,05	5

Tableau 11. Calcul de distances terrain équivalentes à partir des échelles d'affichage calculées

4. Cohérence des Échelles d'Affichage

Pour évaluer la cohérence de ces différentes échelles avec l'échelle d'affichage effective de la carte, nous avons calculé une même distance sur la carte, dans chacune des quatre situations du test. Le Tableau 11 compare ainsi ces mesures à la distance connue équivalente sur le terrain.

Excepté la pyramide Scan Express, qui était alors diffusée sur une interface de visualisation temporaire, interne à l'IGN, les écarts-types obtenus sont inférieurs à 8% de la distance terrain connue, ce que l'on considère négligeable étant donnée l'approximation de nos mesures. **Nous estimons donc que notre échelle d'affichage calculée est cohérente, quel que soit l'écran utilisé.**

En revanche après vérification, il apparait que les échelles d'affichage indiquées numériquement qui ne varient pas sont parfois très incohérentes avec l'échelle effective, comme relevé par [Jenny et al., 2008]. **Pour notre étude, nous avons donc utilisé les valeurs calculées, qui sont cohérentes à la condition que toutes les mesures soient réalisées sur un même écran, à taille et résolution constante.**

Annexe B
Échelles d'Affichages Utilisées dans les Cartes Multi-Échelles Étudiées

Cette annexe présente les échelles d'affichage disponibles dans les pyramides de notre panel d'étude, comparées avec leur niveau de zoom relatif du standard WMTS. Ces échelles ont été calculées selon le protocole présenté en Annexe A.

Niveau de zoom	WMTS	ACT Luxembourg	BEV Autriche	Bing Maps	GDI-DE Allemagne	Google Maps	ICGC Catalogne	IGN Espagne
20	100					167		
19	250			333		333	333	435
18	500	769		667		667	833	855
17	1000	1538		1316	2257	1333	1667	1724
16	2500	3333		2632	4514	2632	3333	3448
15	5000	6250	9091	5263	9028	5263	6667	6849
14	10000	15385	18182	10870	18056	10526	16667	13699
13	25000	31250	45455	21739	36112	20833	33333	27778
12	50000	62500	90909	43478	72224	41667	83333	55556
11	100000	153846	160714	83333	144448	83333	166667	109890
10	250000	333333	454545	166667	288896	166667	333333	222222
9	500000	500000	909091	344828	577792	333333	909091	454545
8	1000000	769231	2777778	689655	1155584	666667	1818182	877193
8	1000000	1538462		1388889	2311167	1333333		1754386
7	2500000			2777778	4622334	2631579		3571429
6	5000000			5555556	9244668	5263158		7042254
5	10000000			10869565		10526316		14084507
4	25000000			20000000		20000000		
3	50000000			50000000		35714286		
2	100000000			92592593				
1	250000000			217391304				
0	500000000							

Figure 161.Échelles d'affichage calculées pour la première partie des pyramides étudiées.

Niveau de zoom	WMTS	Lantmäteriet Suède	NGI Belgique	NLS Finlande	OS Irlande	OSM	Scan IGN France	Scan Express France	Swisstopo	USGS Etats-Unis
20	100	167								
19	250	333					333		345	
18	500	833				667	667		870	
17	1000	1667	2222	1724	1000	1304	1333	1429	1724	
16	2500	3333	4545	3448	2500	2632	2632	2857	3448	
15	5000	6667	8824	6944	5000	5263	5263	5714	6897	7692
14	10000	13333	22222	13889	10000	10345	10526	11429	8696	15385
13	25000		43478	27586	25000	20833	20833	22727	17241	33333
12	50000	52632	88235	55172	50000	41667	41667	47619	34483	66667
11	100000	105263	222222	110345	100000	83333	83333	90909	68966	133333
10	250000	217391	434783	220690	200000	166667	166667	185185	172414	250000
9	500000	434783	714286	441379	400000	333333	333333	370370	344828	500000
8	1000000	833333	1764706	882759	600000	666667	666667	731707	869565	1000000
8	1000000	1666667	3571429	1765517	1250000	1363636	1333333	1428571	1724138	2083333
7	2500000	3448276		3531034	2500000	2631579	2702703	2941176	2272727	4166667
6	5000000	6666667		7062069	4000000	5263158	5555556	6060606		8333333
5	10000000	13333333				10344828	11111111			16666667
4	25000000					20833333	22727273			33333333
3	50000000					47619048	45454545			66666667
2	100000000					120000000	90909091			133333333
1	250000000					263157895				294117647
0	500000000					526315789				

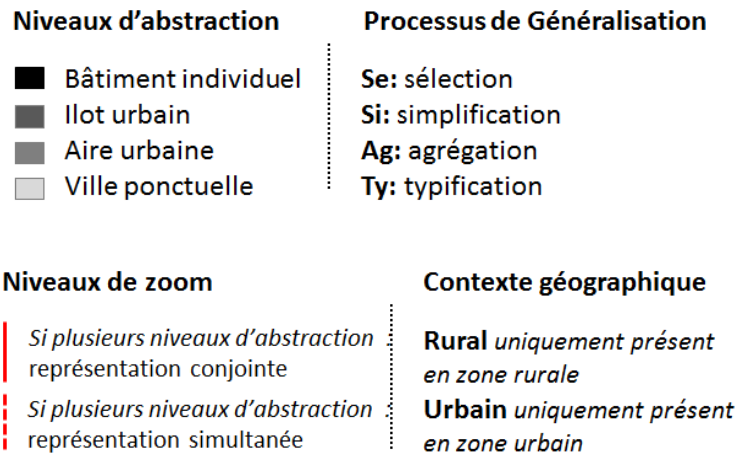
Figure 162. Échelles d'affichage calculées pour la deuxième partie des pyramides étudiées

Annexe C
Évolution de la Représentation du Bâti en Fonction de l'Échelle d'Affichage

Cette annexe présente les résultats de l'analyse de la représentation du bâti en fonction de l'échelle d'affichage. Le protocole d'analyse de cette étude est présenté dans le paragraphe §B.4.2. Pour chaque pyramide indiquée en ordonnée, on représente en fonction de l'échelle d'affichage, représentée quant à elle en abscisse de manière continue, les informations suivantes :

- les **niveaux de zoom** disponibles, symbolisés par un trait rouge vertical ;
- la présence de chaque **niveau d'abstraction**, représentée par une bande grise horizontale, dont le niveau de gris indique le niveau d'abstraction en question : pour représenter de manière continue nos mesures faites aux échelles d'affichage discrètes, nous supposons qu'un changement de représentation intervient au milieu de deux échelles connues ;
- lorsque deux niveaux d'abstraction sont utilisés conjointement dans un même niveau de zoom, l'aspect du niveau de zoom symbolise la nature de la **représentation mixte :** une représentation simultanée si le trait rouge est en pointillés, une représentation conjointe sinon ;
- le **contexte géographique** pour lequel un niveau d'abstraction est utilisé, précisé par l'annotation « Urbain » ou « Rural », rien si le niveau d'abstraction est présent indépendamment du contexte ;
- l'utilisation de chaque **processus de généralisation**, par la présence du code correspondant (Se, Si, Ag, Ty) à droite du niveau de zoom résultat.

La légende de ces graphiques est donnée ci-dessous :



1. Évolution de la Représentation du Bâti entre les Échelles d'Affichage 0 et 1 : 10k

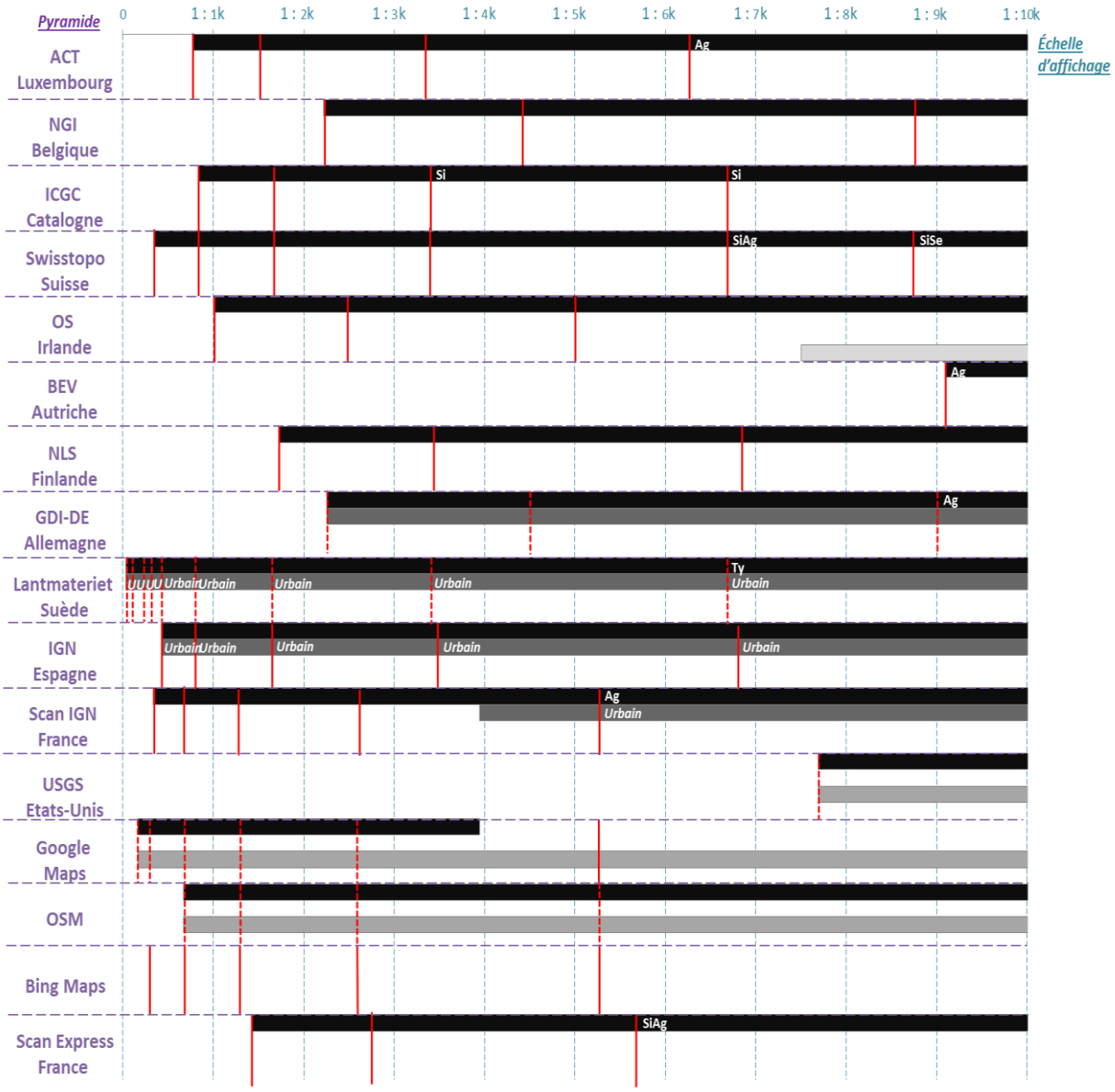


Figure 163. Extrait du graphe représentant les résultats d'analyse de l'évolution de la représentation du bâti en fonction de l'échelle d'affichage dans les cartes multi-échelles étudiées, sur la gamme d'échelles entre 0 et 1 : 10k.

2. Évolution de la Représentation du Bâti entre les Échelles d'Affichage 1 : 10k et 1 : 100k

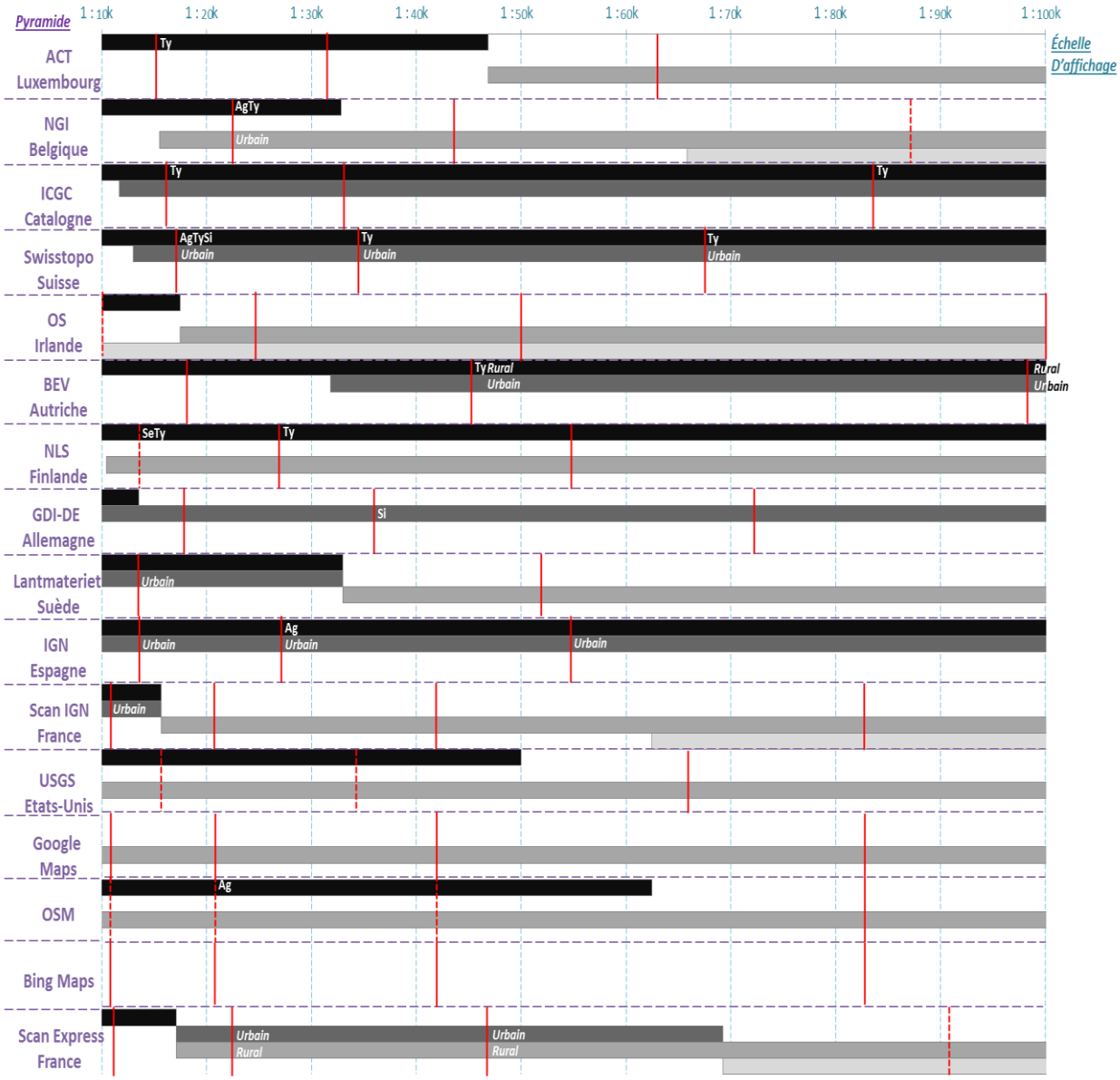


Figure 164. Extrait du graphe représentant les résultats d'analyse de l'évolution de la représentation du bâti en fonction de l'échelle d'affichage dans les cartes multi-échelles étudiées, sur la gamme d'échelles entre 1 : 10k et 1 : 100k.

3. Évolution de la Représentation du Bâti entre les Échelles d'Affichage 1 : 100k et 1 : 1M

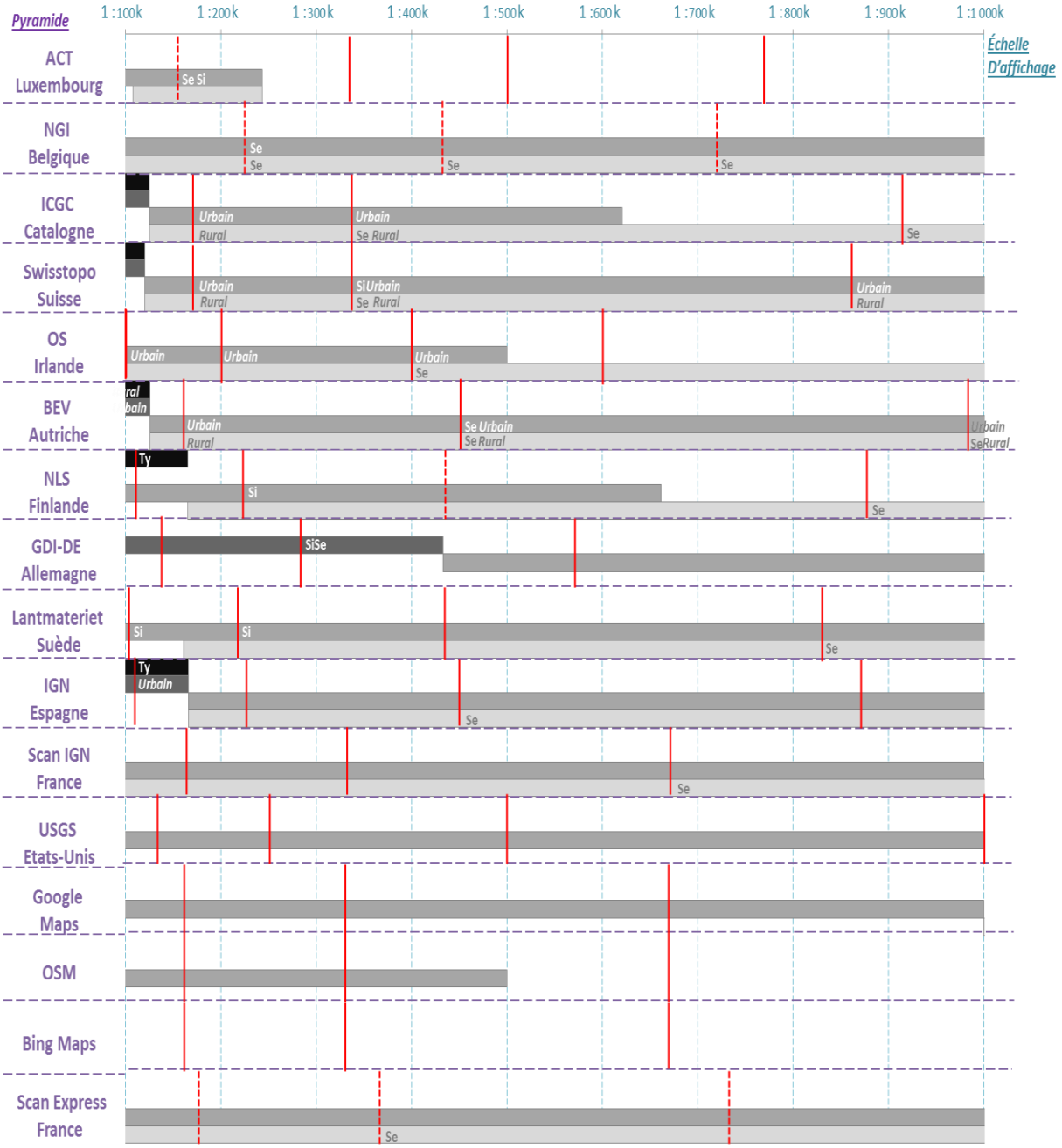


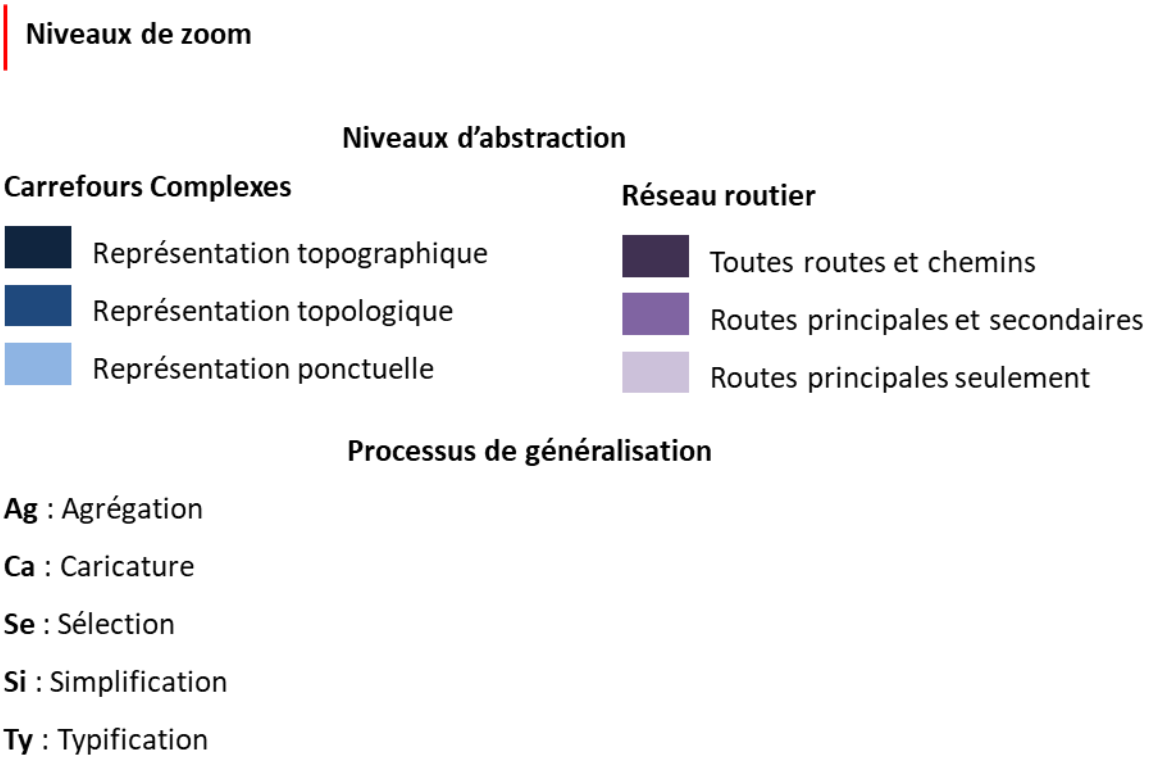
Figure 165. Extrait du graphe représentant les résultats d'analyse de l'évolution de la représentation du bâti en fonction de l'échelle d'affichage dans les cartes multi-échelles étudiées, sur la gamme d'échelles entre 1 : 100k et 1 : 1 000k.

Annexe D
Évolution de la Représentation du Routier en Fonction de l'Échelle d'Affichage

Cette annexe présente les résultats de l'analyse de la représentation du routier en fonction de l'échelle d'affichage. Le protocole d'analyse de cette étude est présenté dans le paragraphe §B.4.4. Comme expliqué dans cette partie, nous distinguons l'analyse des niveaux d'abstraction utilisés pour les carrefours complexes (graphiques 1 à 3, en dégradé de bleu) et le réseau routier (graphiques 4 à 6, en dégradé de violet). Pour chaque pyramide indiquée en ordonnée, on représente en fonction de l'échelle d'affichage, représentée quant à elle en abscisse de manière continue, les informations suivantes :

- les **niveaux de zoom** disponibles, symbolisés par un trait rouge vertical ;
- la présence de chaque **niveau d'abstraction**, représentée par une bande horizontale, dont la couleur indique le niveau d'abstraction en question : pour représenter de manière continue nos mesures faites aux échelles d'affichage discrètes, nous supposons qu'un changement de représentation intervient au milieu de deux échelles connues ;
- l'utilisation de chaque **processus de généralisation** (uniquement pour le réseau routier), par la présence du code correspondant (Se, Si, Ag, Ca, Ty) à droite du niveau de zoom résultat.

La légende de ces graphiques est donnée ci-dessous :



1. Évolution de la Représentation des Carrefours Complexes entre les Échelles d'Affichage 0 et 1 : 10k

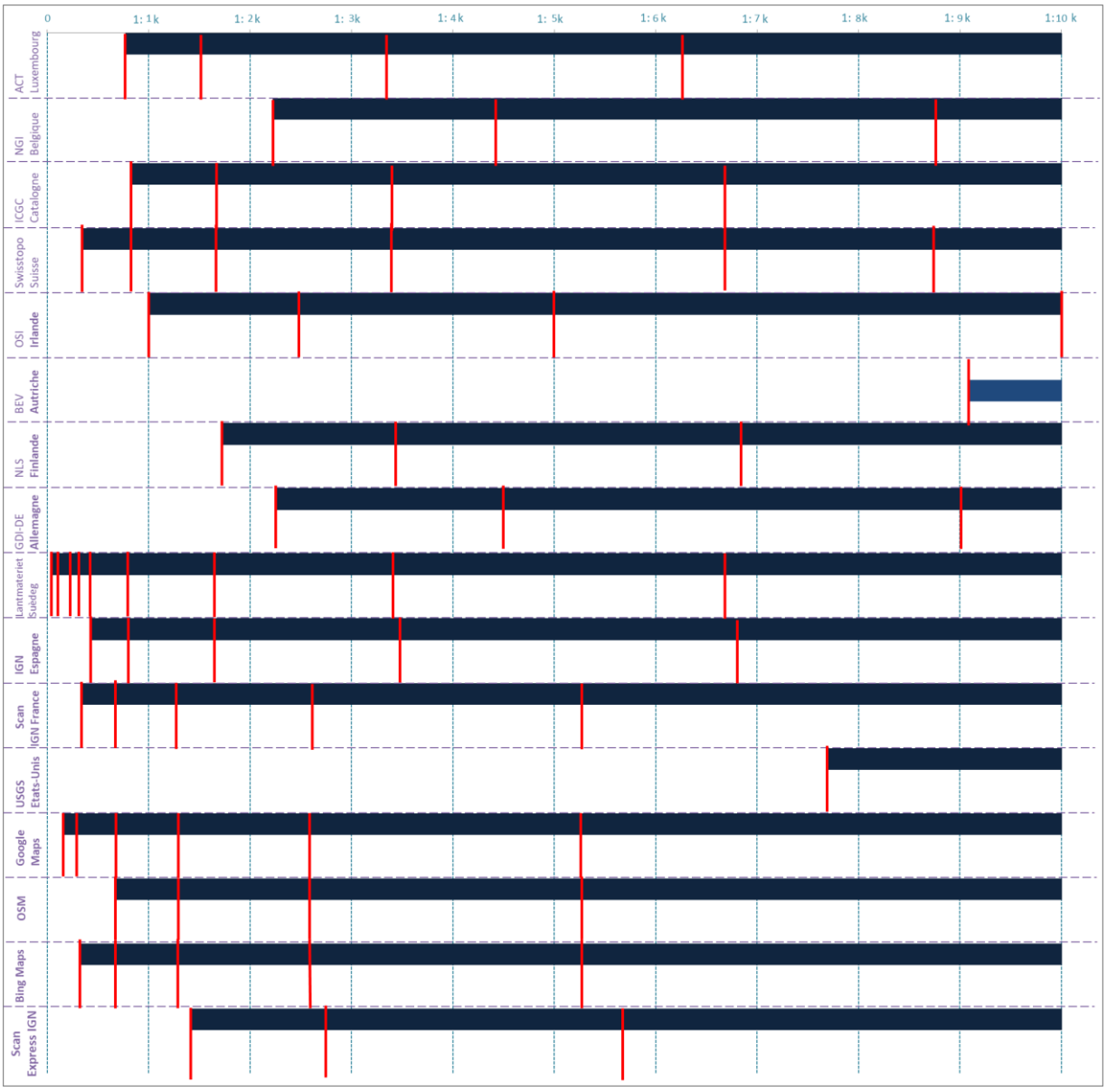


Figure 166. Extrait du graphe représentant les résultats d'analyse de l'évolution de la représentation des carrefours complexes en fonction de l'échelle d'affichage dans les cartes multi-échelles étudiées, sur la gamme d'échelles entre 0 et 1 : 10k.

2. Évolution de la Représentation des Carrefours Complexes entre les Échelles d'Affichage 1 : 10k et 1 : 100k

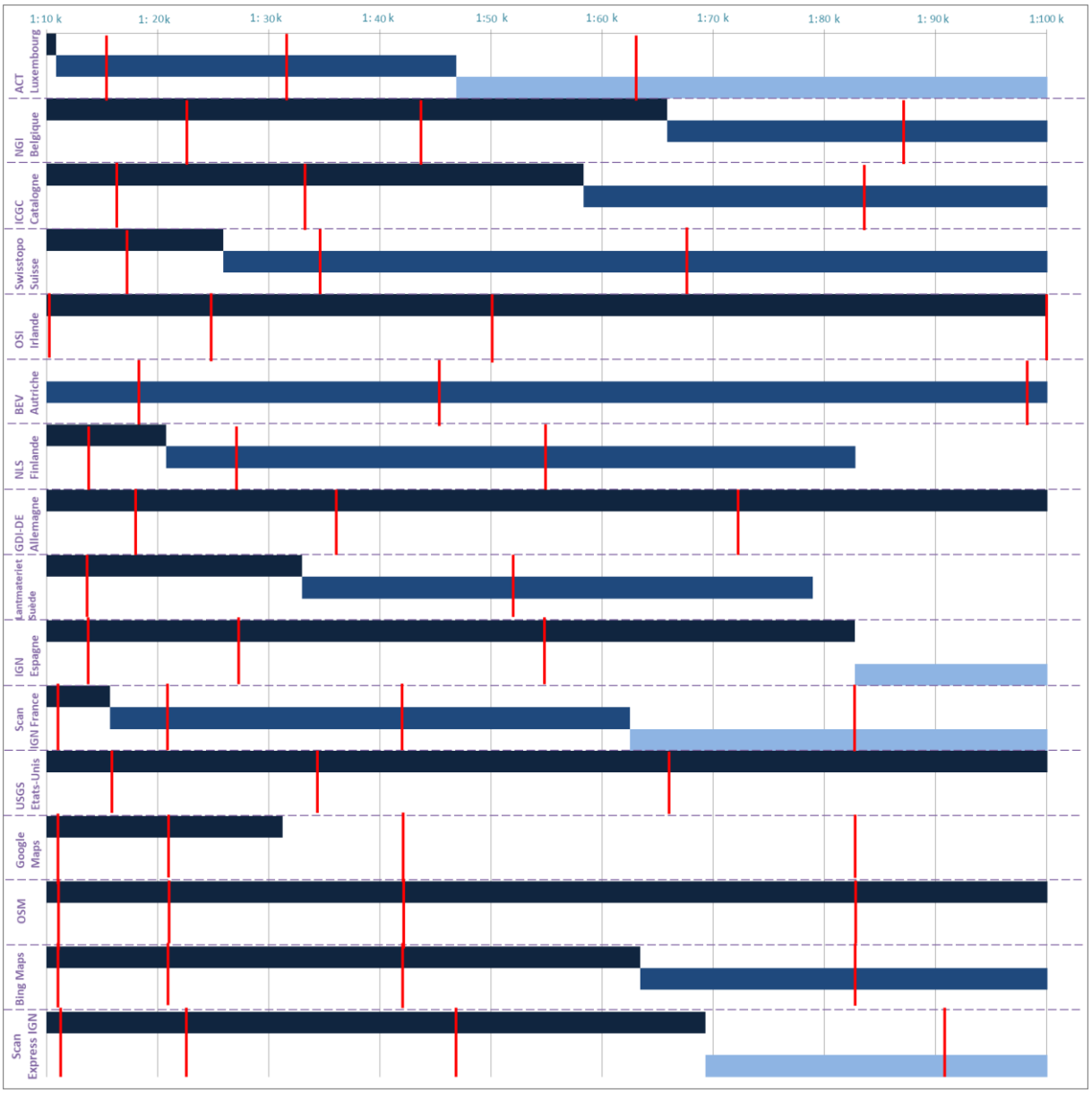


Figure 167. Extrait du graphe représentant les résultats d'analyse de l'évolution de la représentation des carrefours complexes en fonction de l'échelle d'affichage dans les cartes multi-échelles étudiées, sur la gamme d'échelles entre 1 : 10k et 1 : 100k.

3. Évolution de la Représentation des Carrefours Complexes entre les Échelles d'Affichage 1 : 100k et 1 : 1M

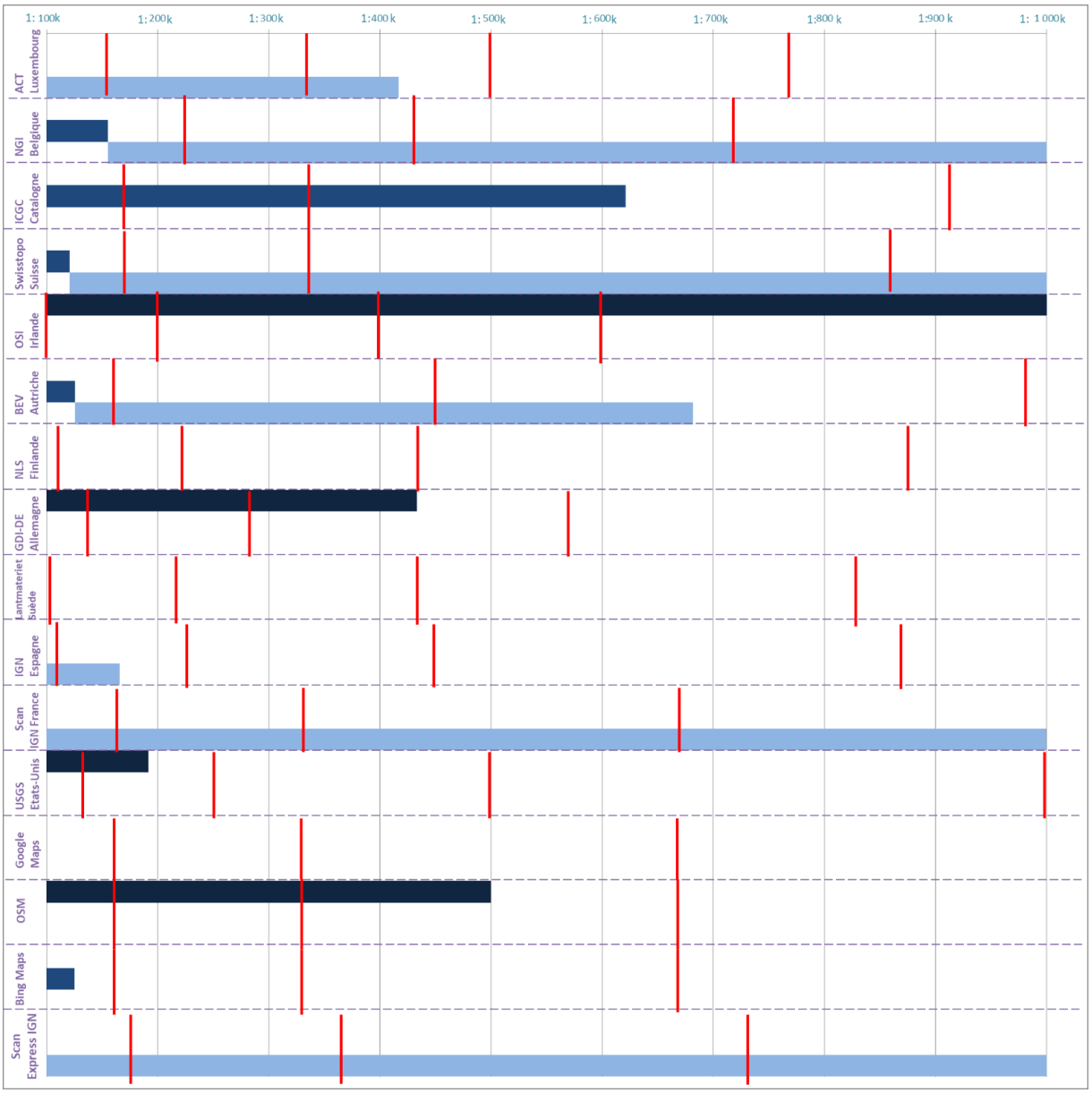


Figure 168. Extrait du graphe représentant les résultats d'analyse de l'évolution de la représentation des carrefours complexes en fonction de l'échelle d'affichage dans les cartes multi-échelles étudiées, sur la gamme d'échelles entre 1 : 100k et 1 : 1 000k.

4. Évolution de la Représentation du Réseau Routier entre les Échelles d'Affichage 0 et 1 : 10k

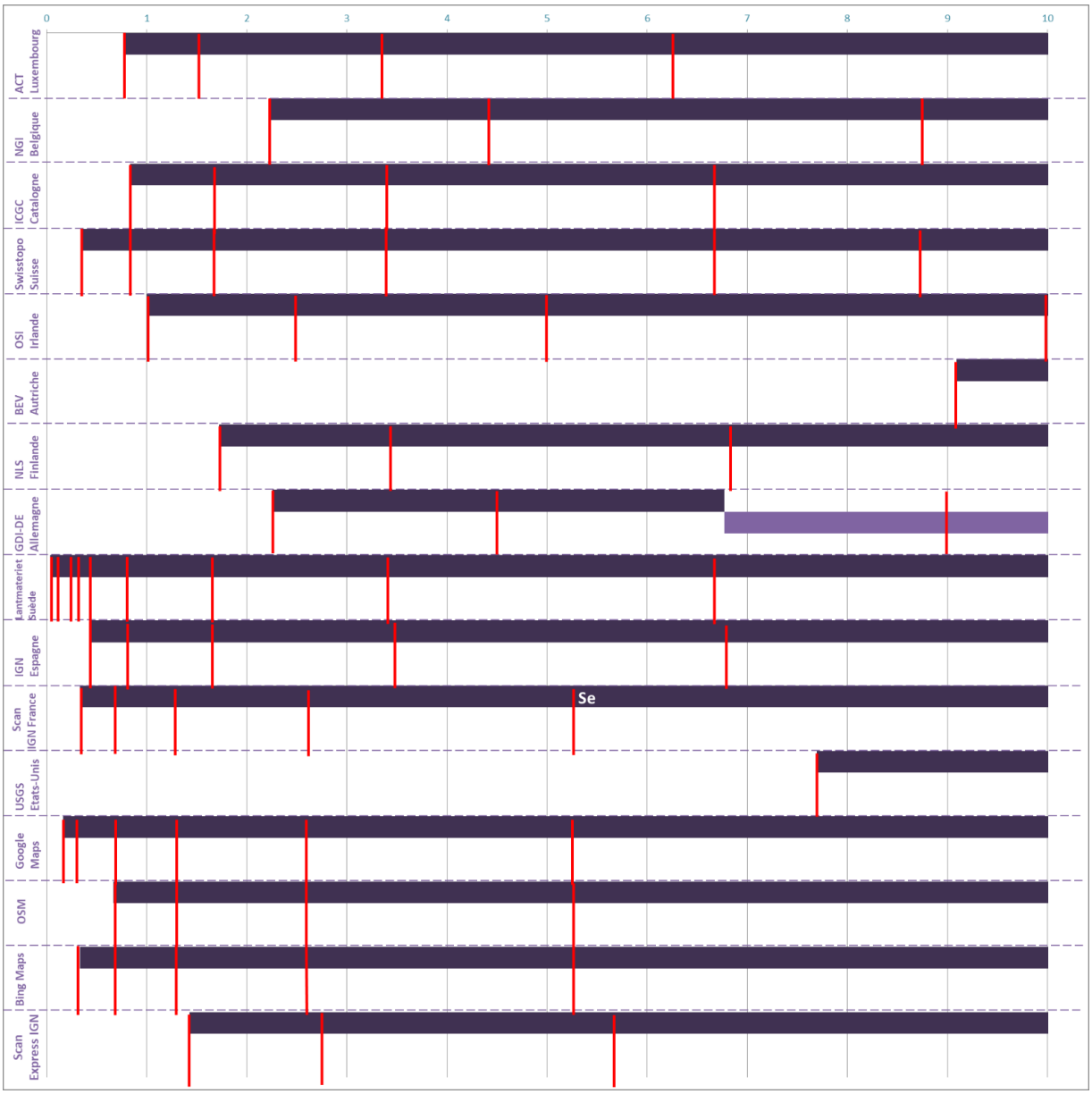


Figure 169. Extrait du graphe représentant les résultats d'analyse de l'évolution de la représentation du réseau routier en fonction de l'échelle d'affichage dans les cartes multi-échelles étudiées, sur la gamme d'échelles entre 0 et 1 : 10k.

5. Évolution de la Représentation du Réseau Routier entre les Échelles d'Affichage 1 : 10k et 1 : 100k

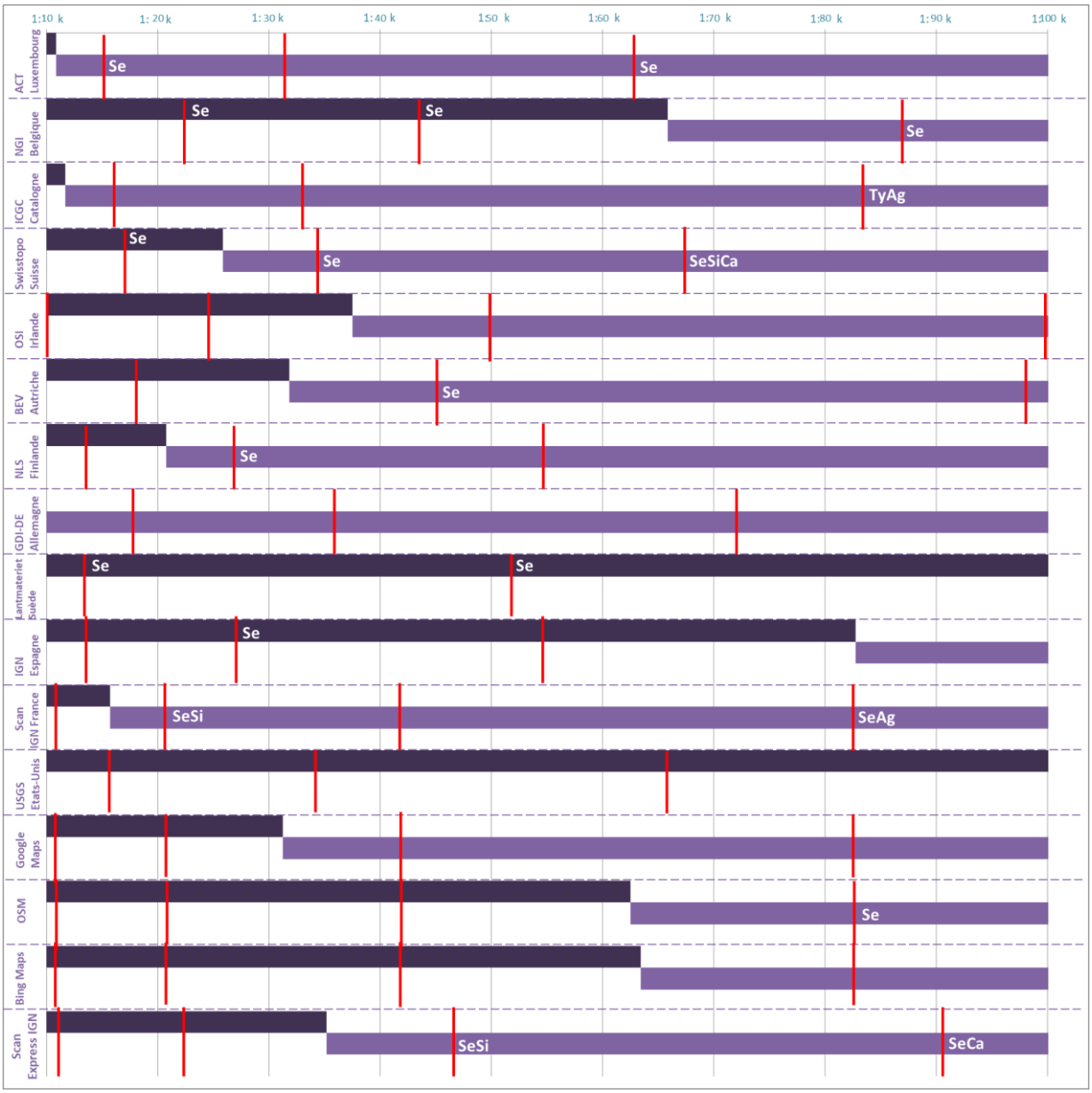


Figure 170. Extrait du graphe représentant les résultats d'analyse de l'évolution de la représentation du réseau routier en fonction de l'échelle d'affichage dans les cartes multi-échelles étudiées, sur la gamme d'échelles entre 1 : 10k et 1 : 100k.

6. Évolution de la Représentation du Réseau Routier entre les Échelles d'Affichage 1 : 100k et 1 : 1M

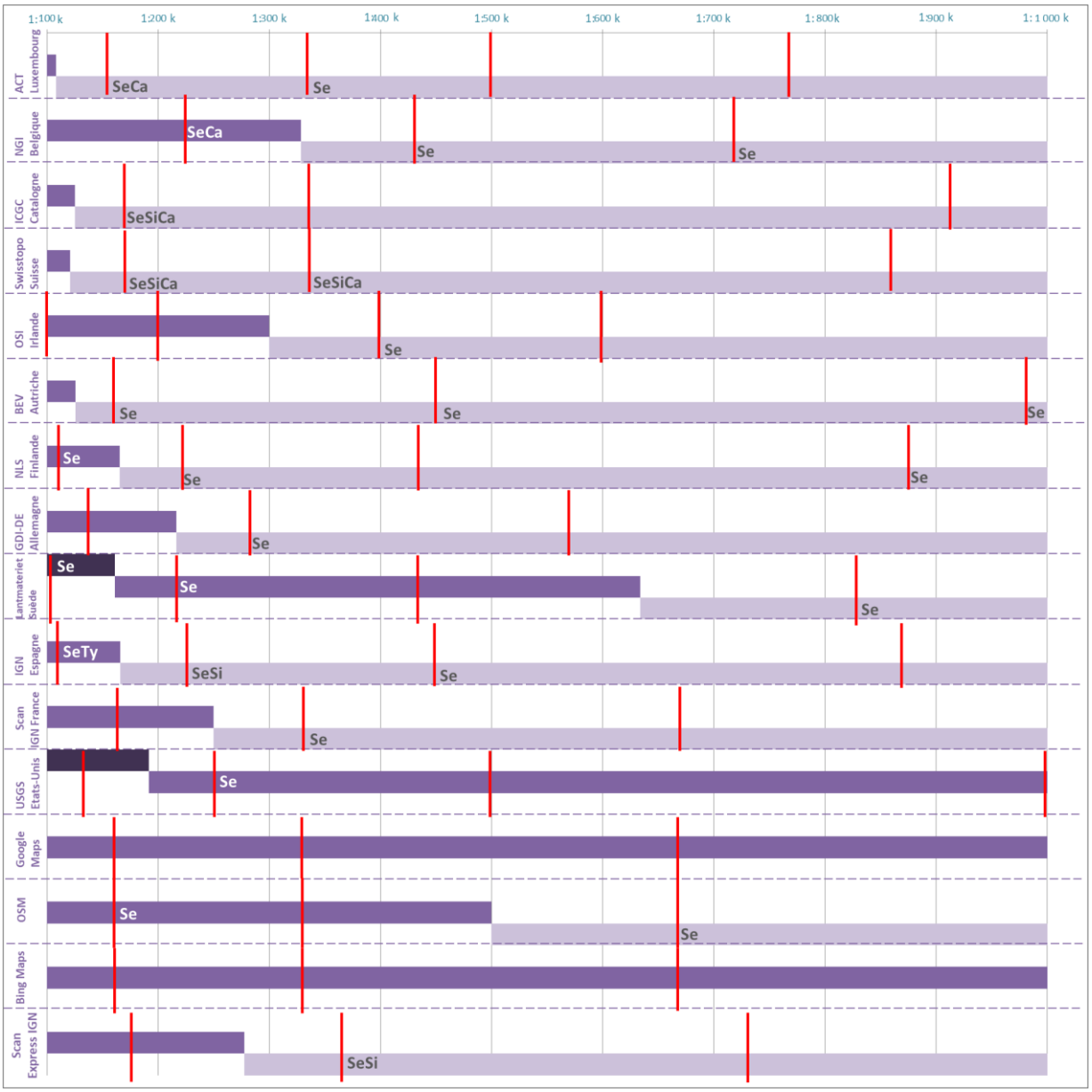


Figure 171. Extrait du graphe représentant les résultats d'analyse de l'évolution de la représentation du réseau routier en fonction de l'échelle d'affichage dans les cartes multi-échelles étudiées, sur la gamme d'échelles entre 1 : 100k et 1 : 1 000k.

Annexe E
Échantillons des pyramides étudiées

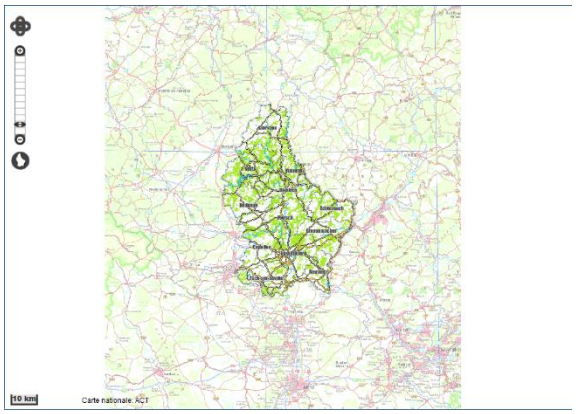
Les échantillons qui sont reportés ici sont utilisés pour l'analyse de l'évolution de la complexité par des mesures de clutter, présentée dans la partie §B.5. Pour chaque carte multi-échelle, nous avons réalisé une capture d'écran à chaque niveau de zoom disponible. Pour chaque pyramide, chaque échantillon représente la même emprise écran, c'est-à-dire qu'ils sont tous de la même taille et centré sur le même point.

Le numéro du niveau indiqué pour chaque échantillon est l'identifiant du niveau de zoom WMTS correspondant, selon les tables de l'Annexe B. Lorsque le géoportail étudié utilise deux niveaux de zoom autour d'un niveau 8 WMTS (comme expliqué dans la partie §B.3.2), nous avons respectivement nommés les niveaux 8 et 8bis. Nous avons également appliqué cette convention pour les niveaux additionnels dans le géoportail de Lantmäteriet Suède, qui propose plus de niveaux de zoom que le standard.

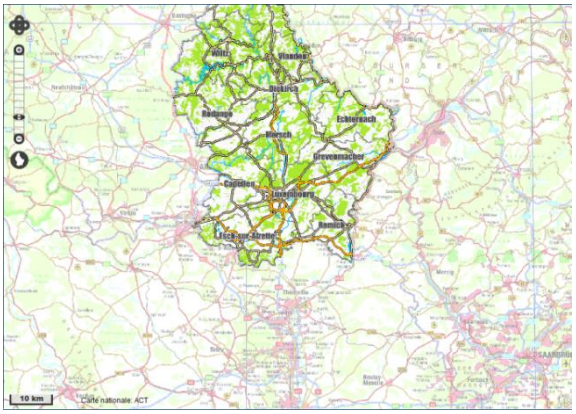
Ces échantillons peuvent être obtenus au format numérique sur simple demande, pour comparaison avec d'autres méthodes d'évaluation de la complexité visuelle par exemple (marion.dumont@ign.fr).

1. ACT Luxembourg

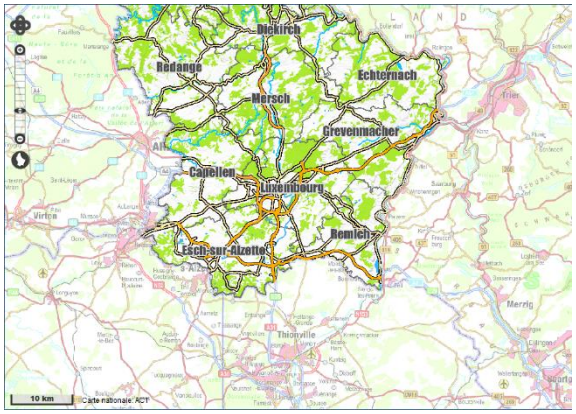
Niveau 8



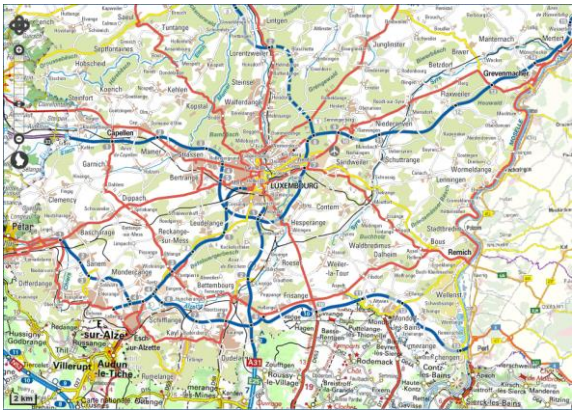
Niveau 8bis



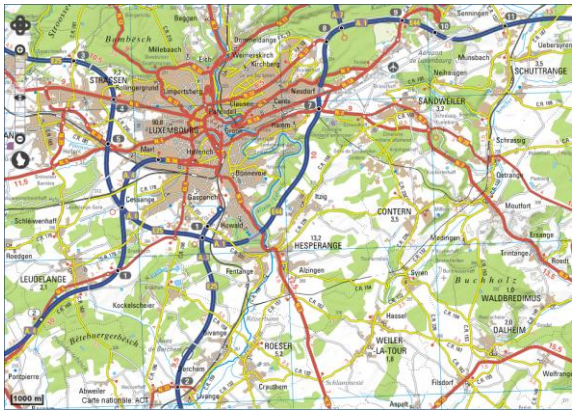
Niveau 9



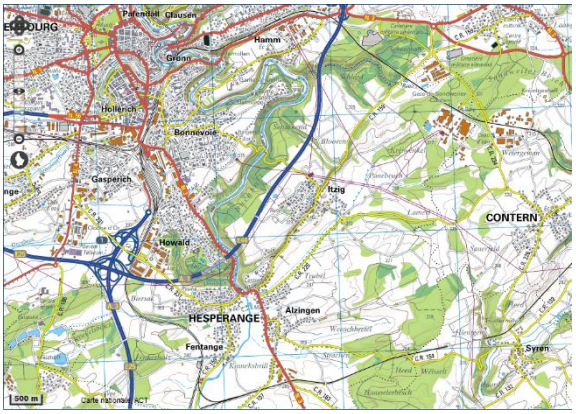
Niveau 10



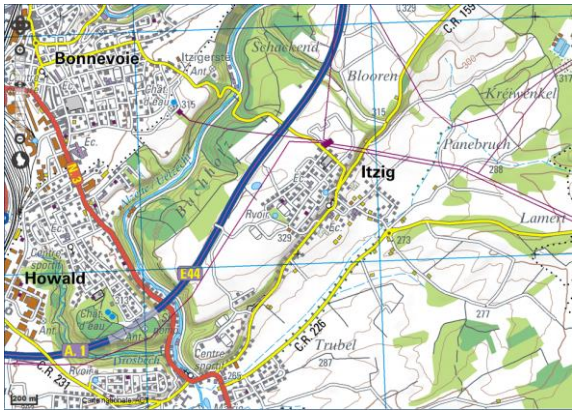
Niveau 11



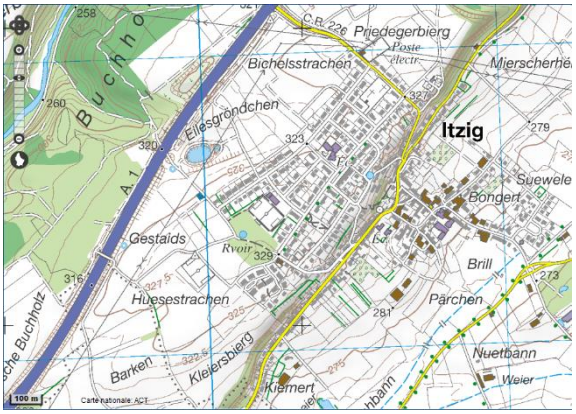
Niveau 12



Niveau 13



Niveau 14



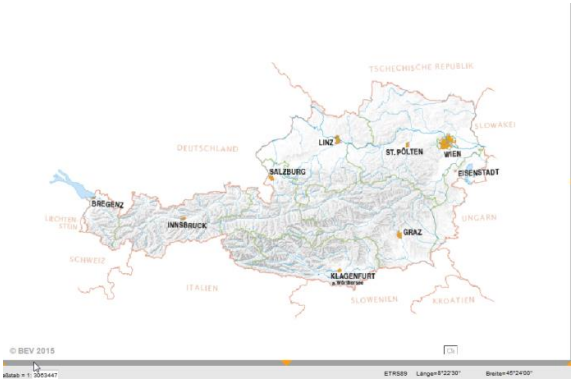
Niveau 15

Niveau 16

Niveau 17

Niveau 18

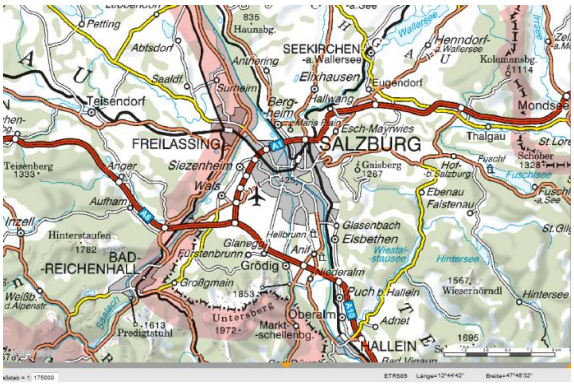
2. BEV Autriche



Niveau 8

Niveau 9

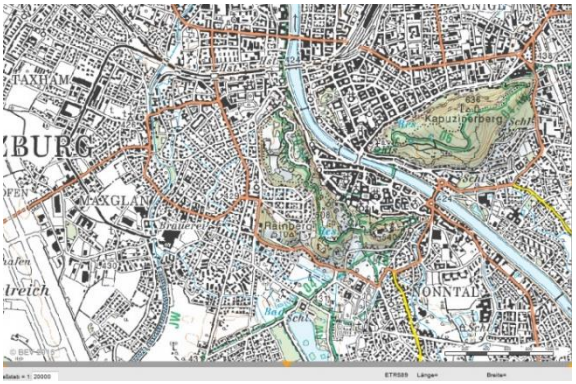
Niveau 10



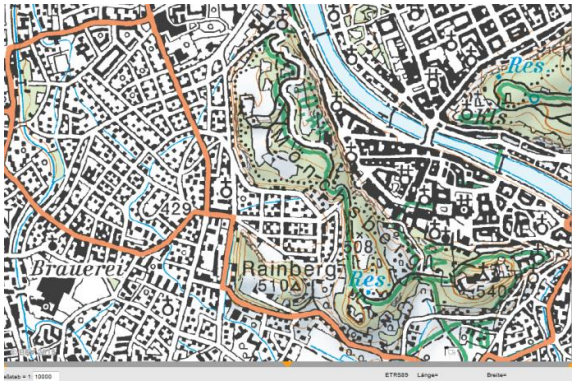
Niveau 11

Niveau 12

Niveau 13

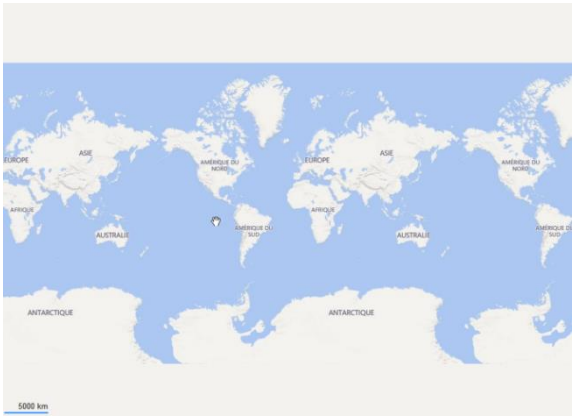


Niveau 14



Niveau 15

3. Bing Maps



Niveau 1

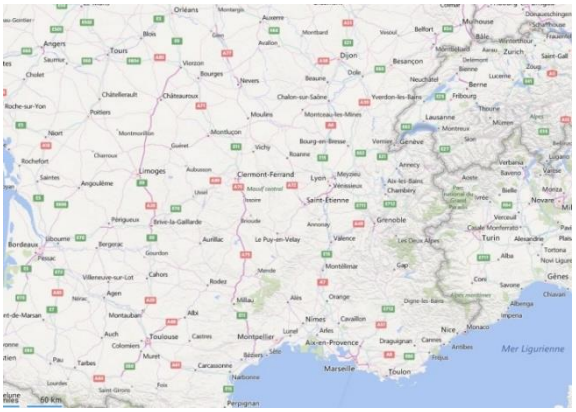
Niveau 2

Niveau 3

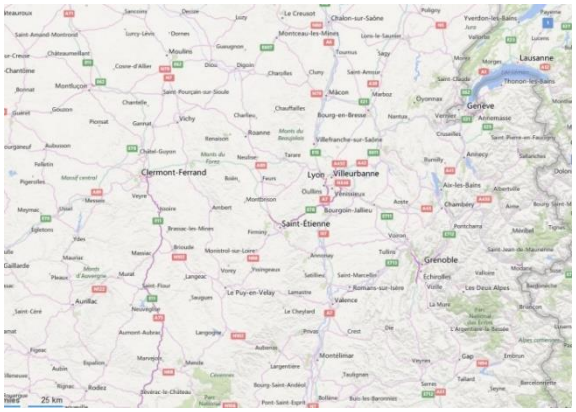
Niveau 4

Niveau 5

Niveau 6

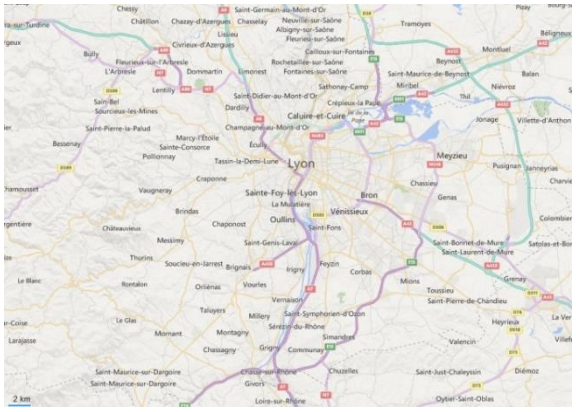


Niveau 7



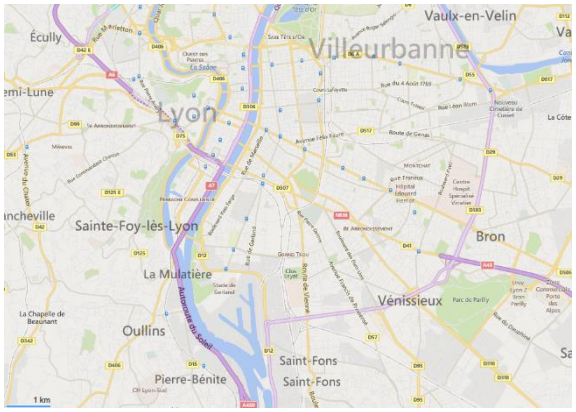
Niveau 8

Niveau 9

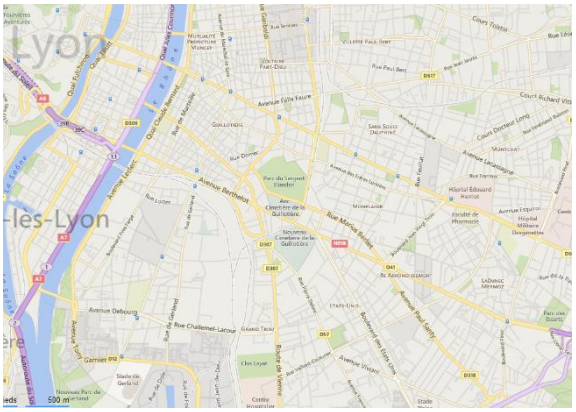


Niveau 10

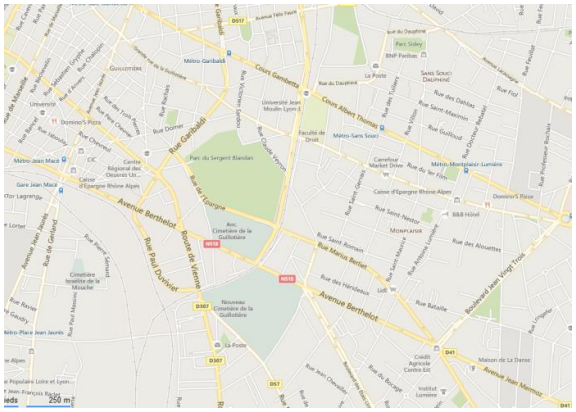
Niveau 11



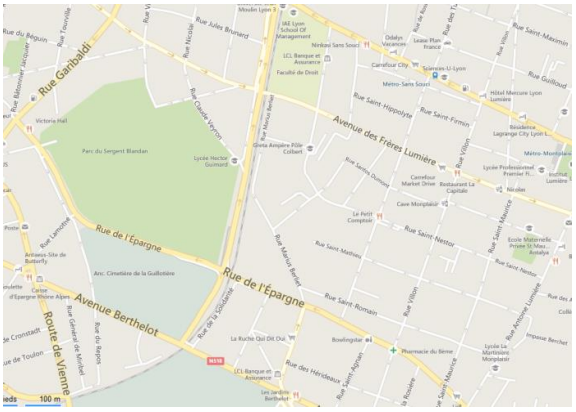
Niveau 12



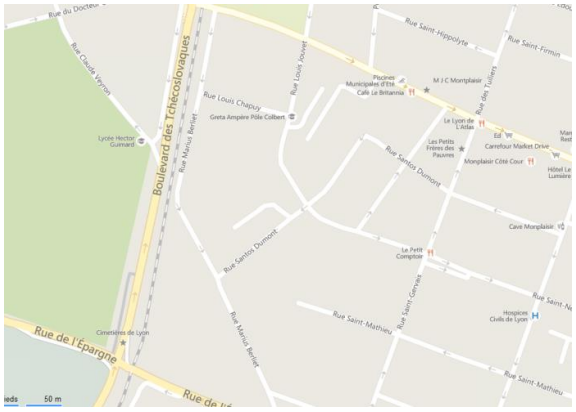
Niveau 13



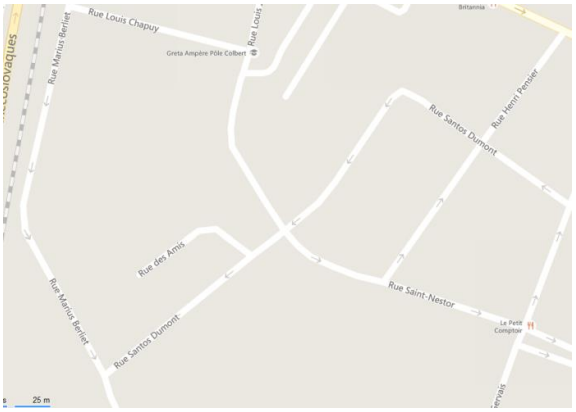
Niveau 14



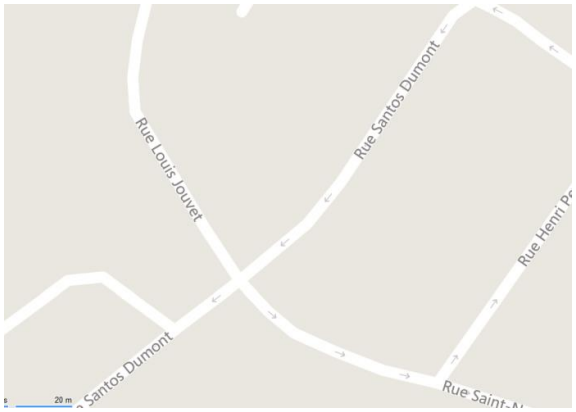
Niveau 15



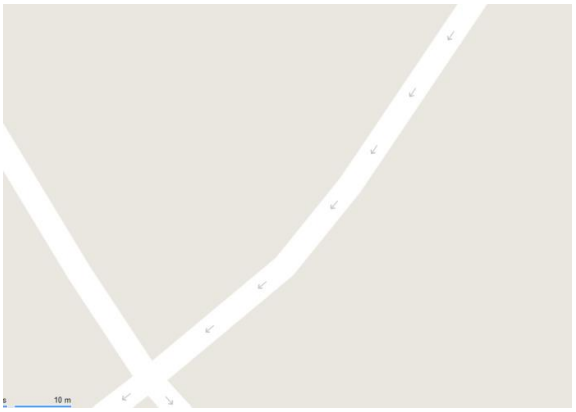
Niveau 16



Niveau 17

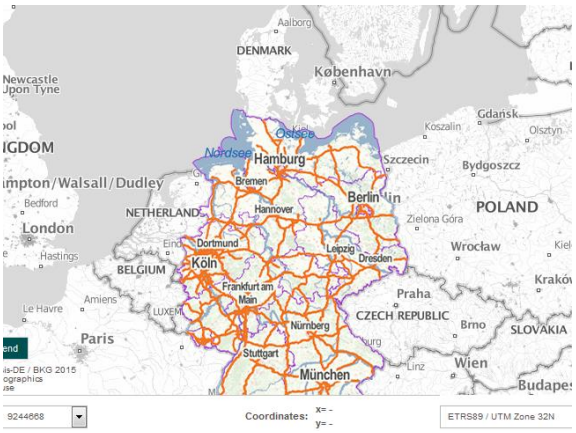


Niveau 18

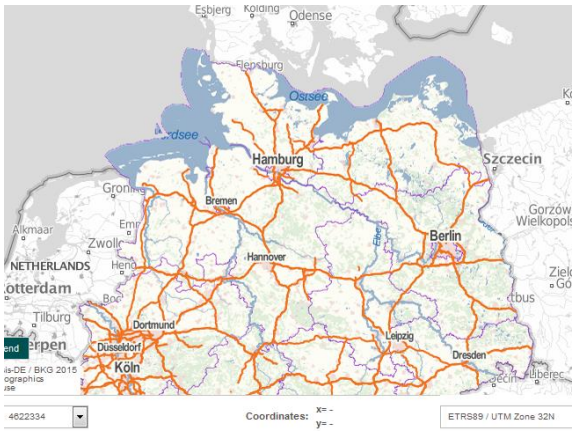


Niveau 19

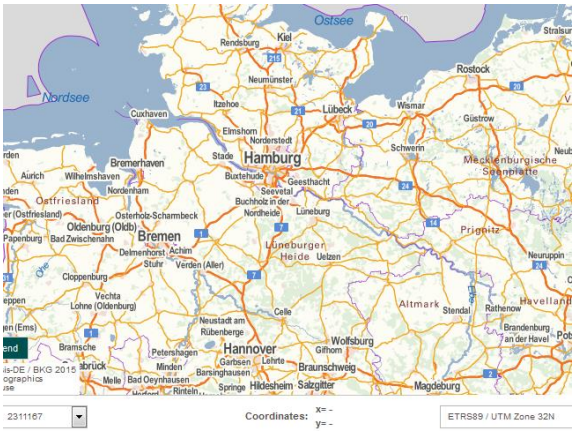
4. GDI Allemagne



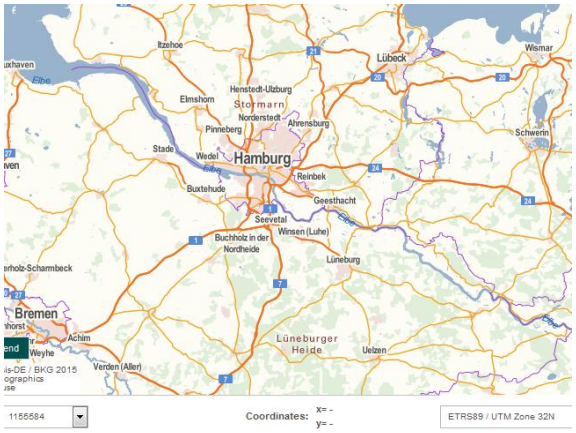
Niveau 5



Niveau 6

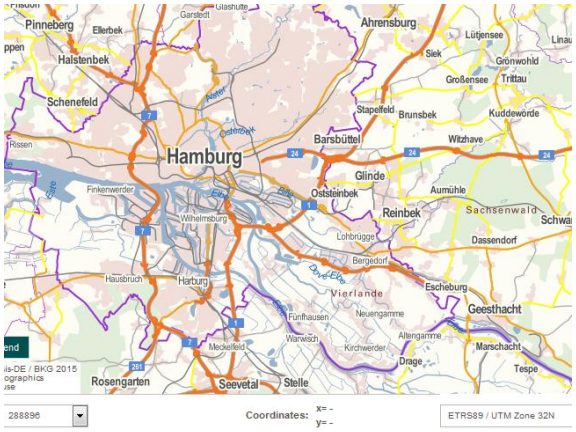


Niveau 7



Niveau 8

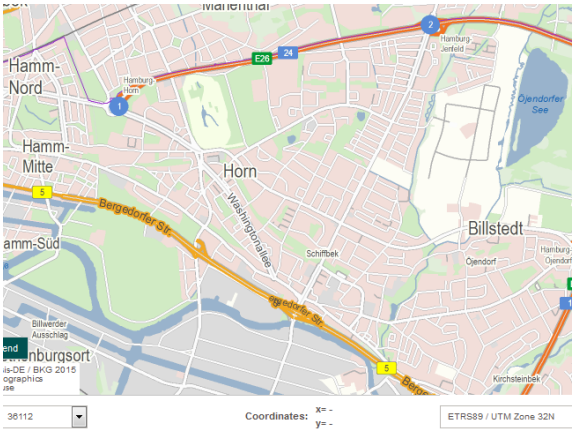
Niveau 9



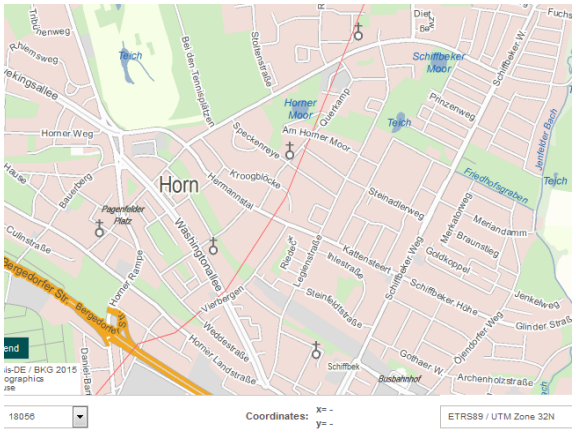
Niveau 10

Niveau 11

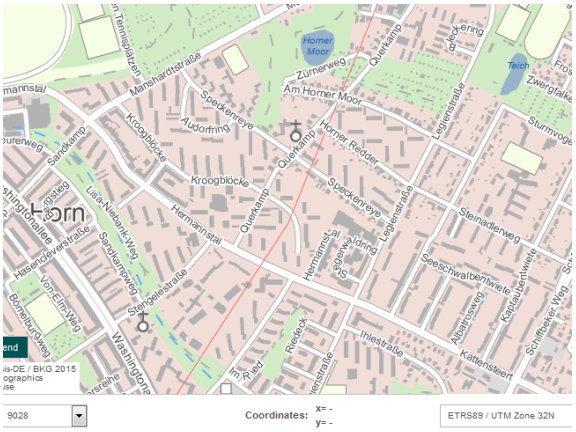
Niveau 12



Niveau 13

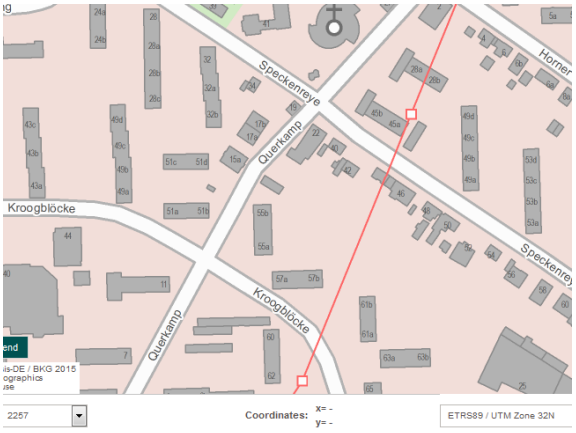


Niveau 14



Niveau 15

Niveau 16



Niveau 17

5. Google Maps

Niveau 3

Niveau 4

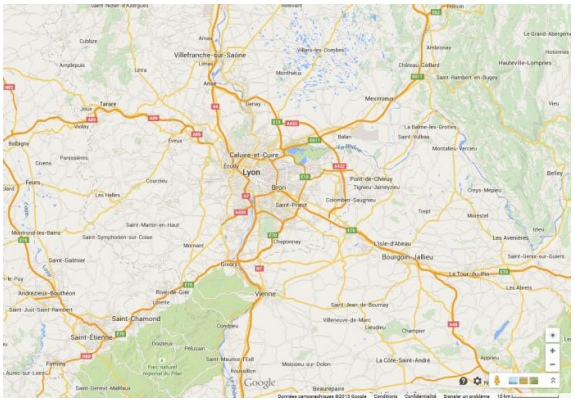
Niveau 5

Niveau 6

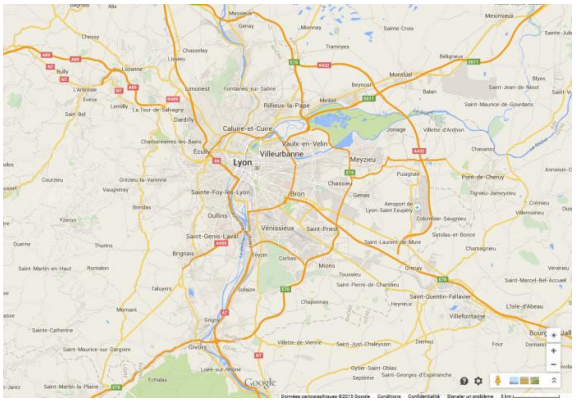
Niveau 7

Niveau 8

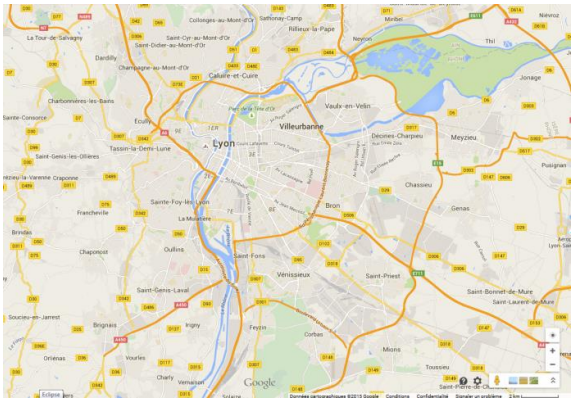
Niveau 8bis



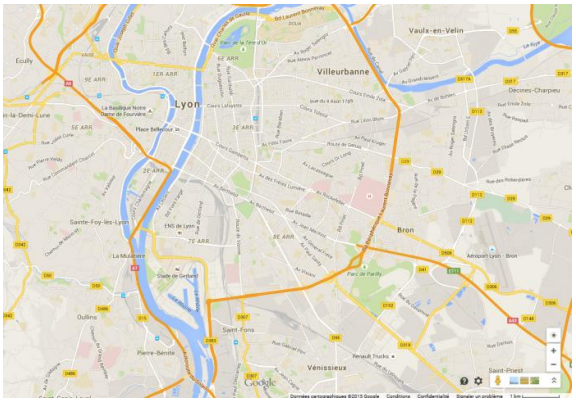
Niveau 9



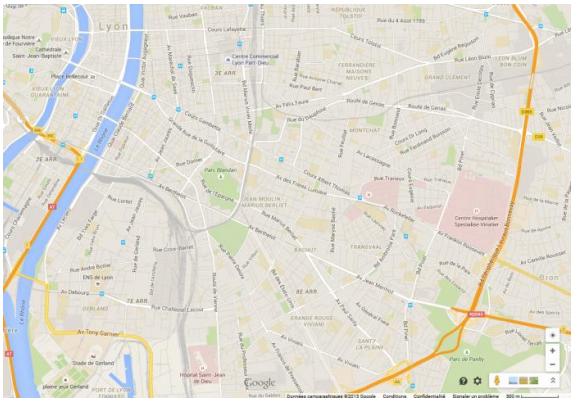
Niveau 10



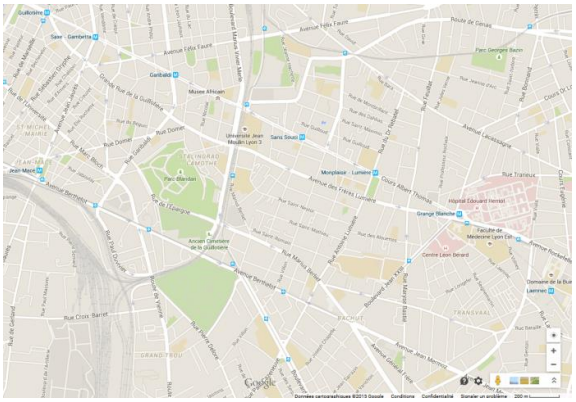
Niveau 11



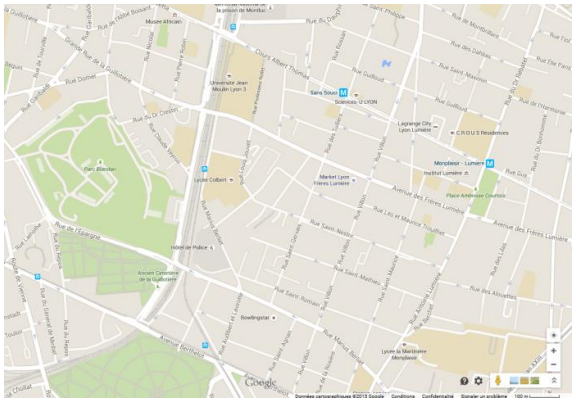
Niveau 12



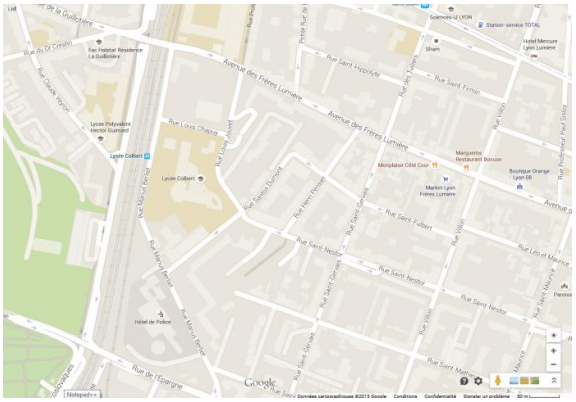
Niveau 13



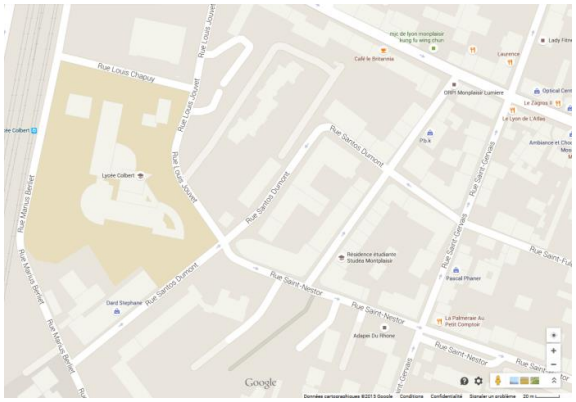
Niveau 14



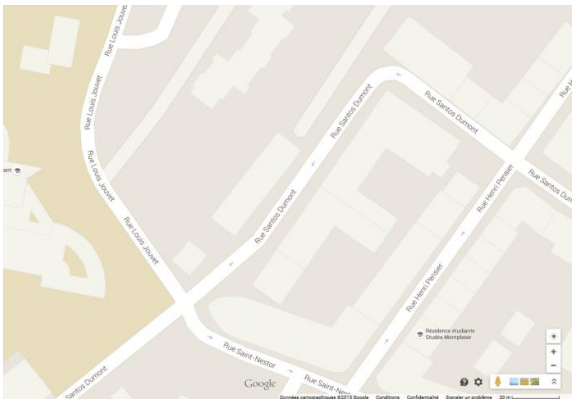
Niveau 15



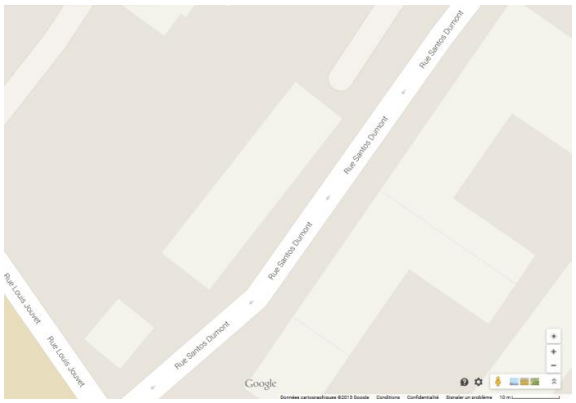
Niveau 16



Niveau 17



Niveau 18



Niveau 19

Niveau 20

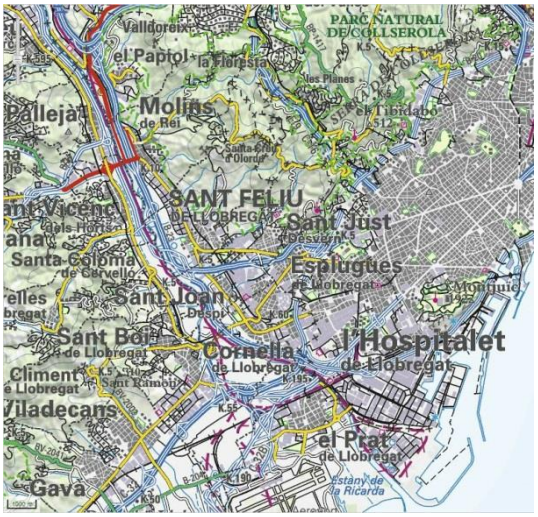
6. ICGC Catalogne

Niveau 8

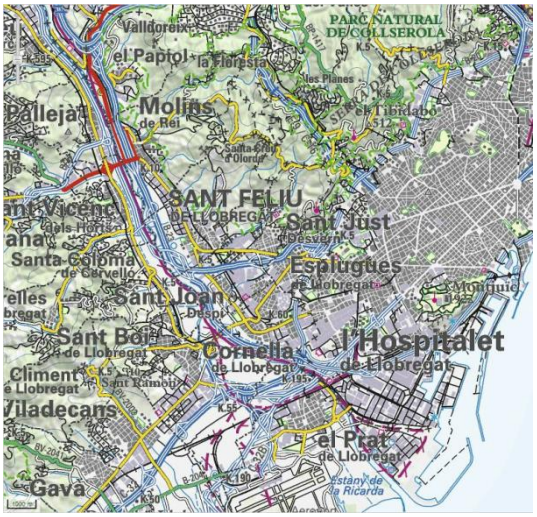
Niveau 8bis

Niveau 9

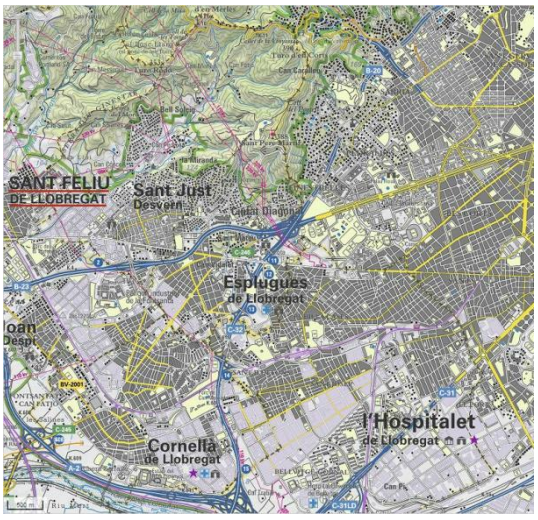
Niveau 10



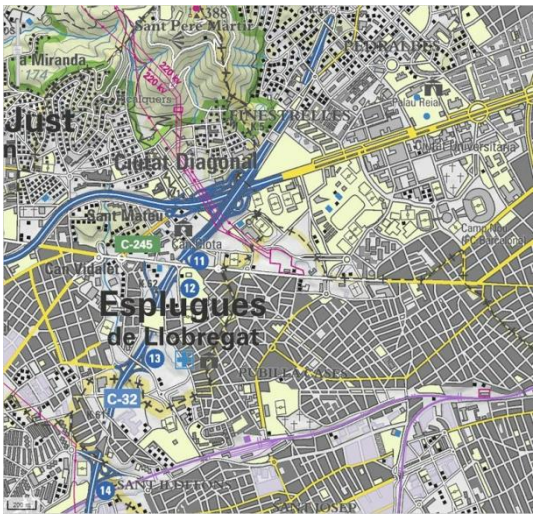
Niveau 11



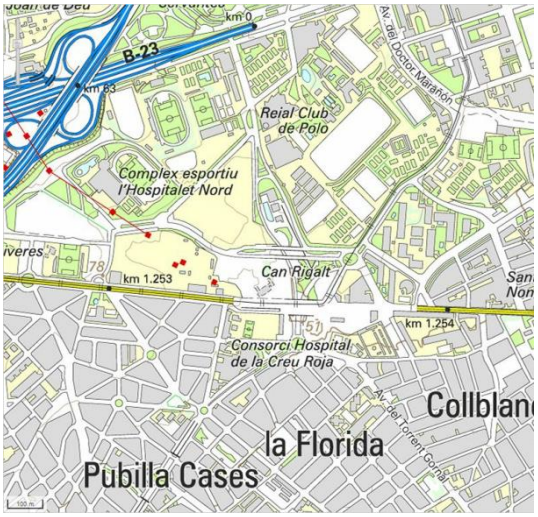
Niveau 12



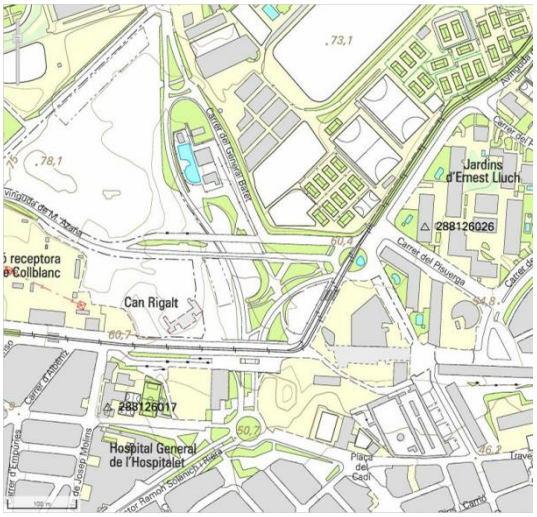
Niveau 13



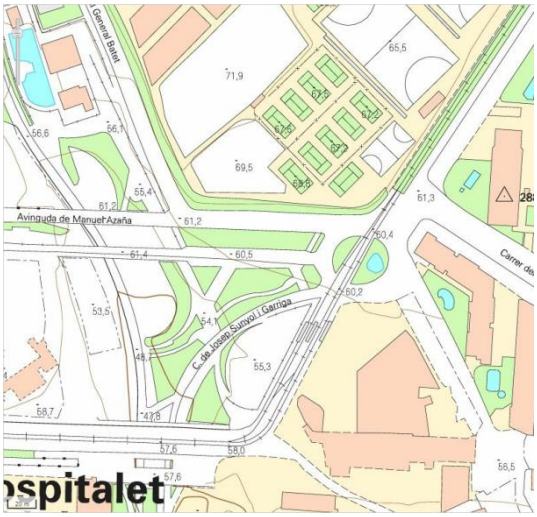
Niveau 14



Niveau 15

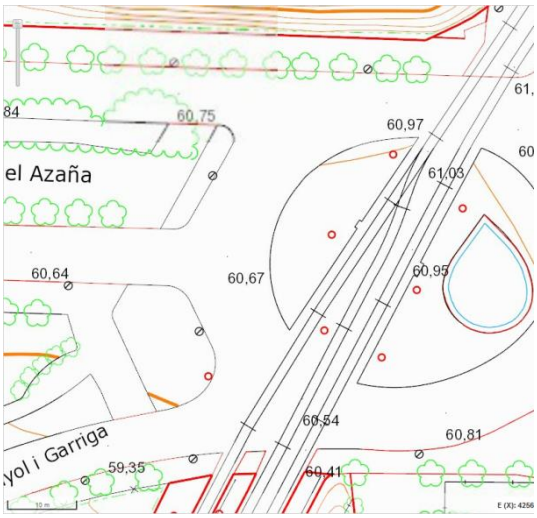


Niveau 16



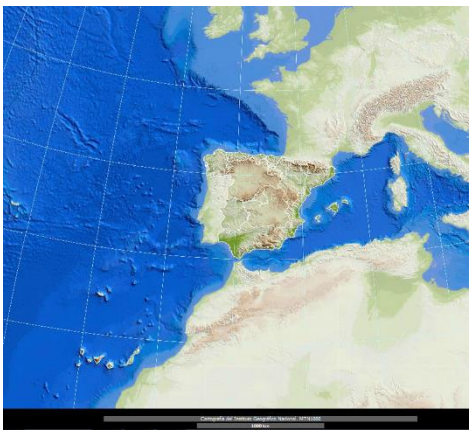
Niveau 17

Niveau 18

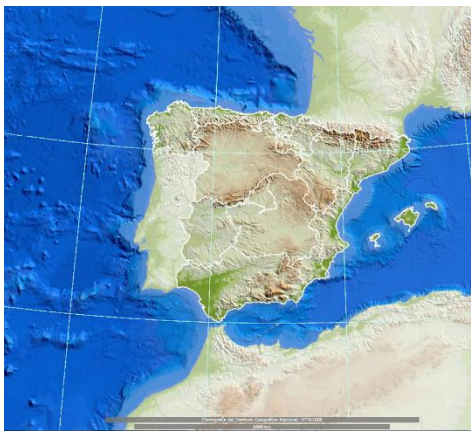


Niveau 19

7. IGN Espagne

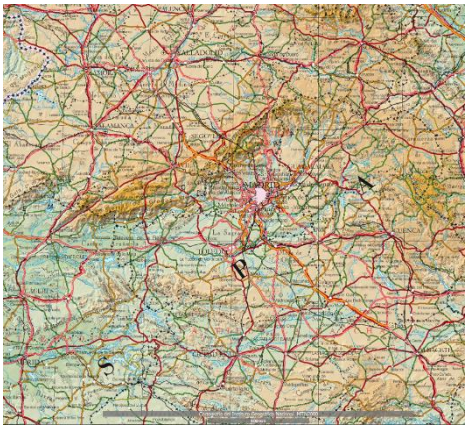


Niveau 5

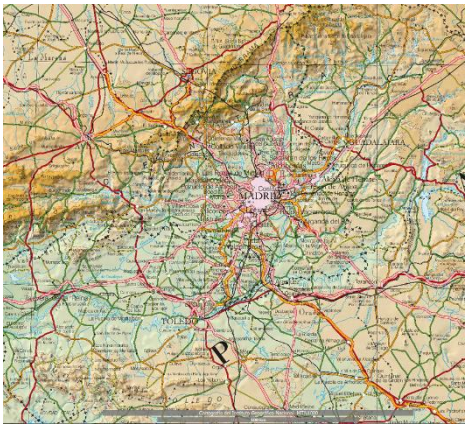


Niveau 6

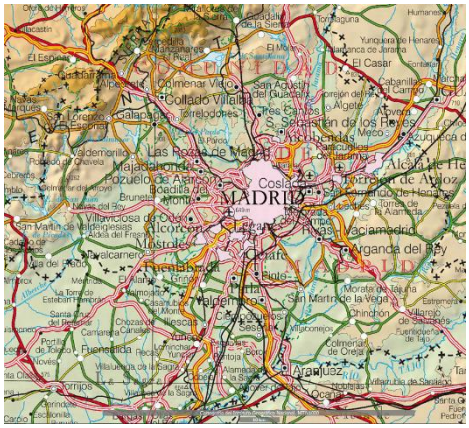
Niveau 7



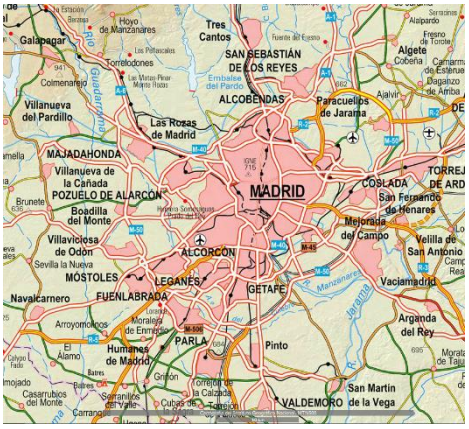
Niveau 8



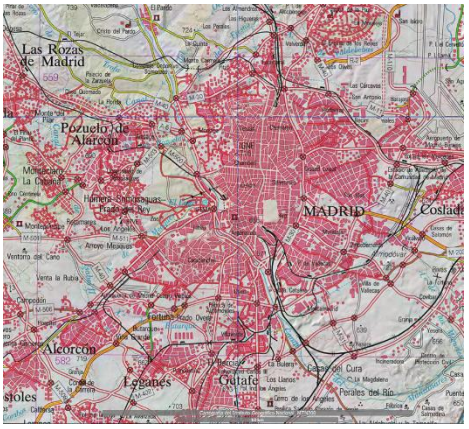
Niveau 8bis



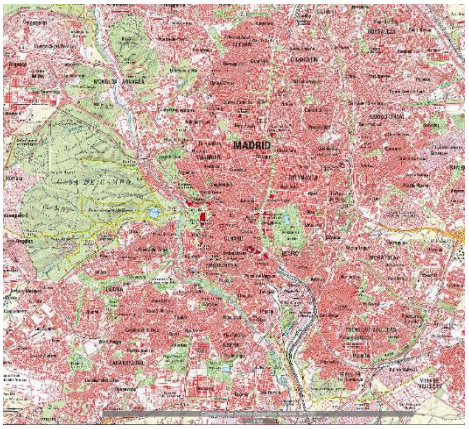
Niveau 9



Niveau 10

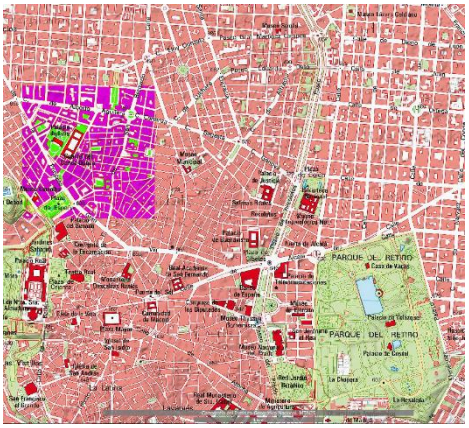


Niveau 11

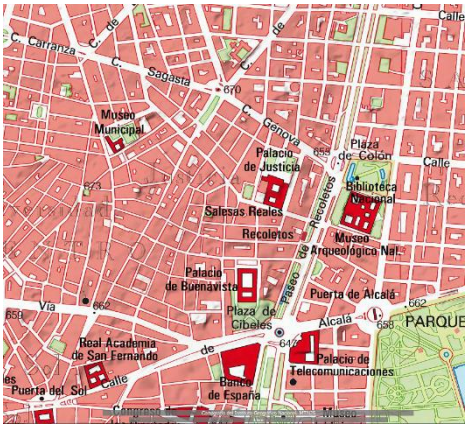


Niveau 12

Niveau 13



Niveau 14

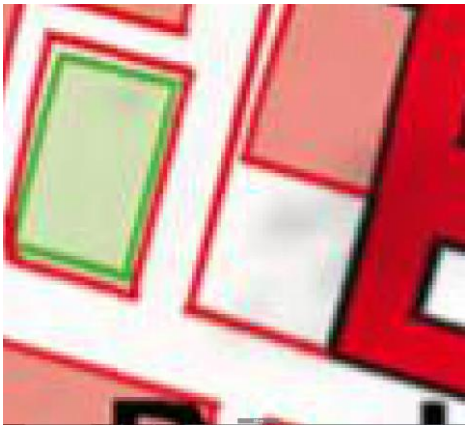


Niveau 15

Niveau 16

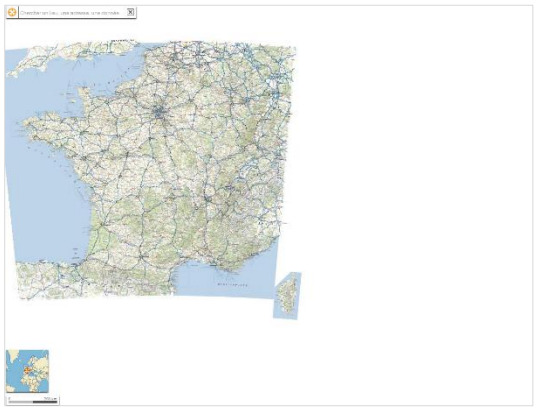
Niveau 17

Niveau 18



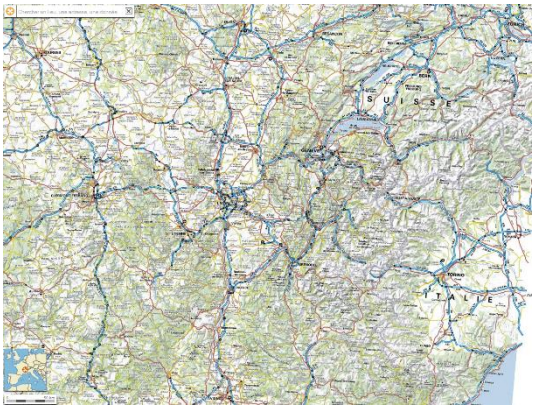
Niveau 19

8. IGN Scan Express

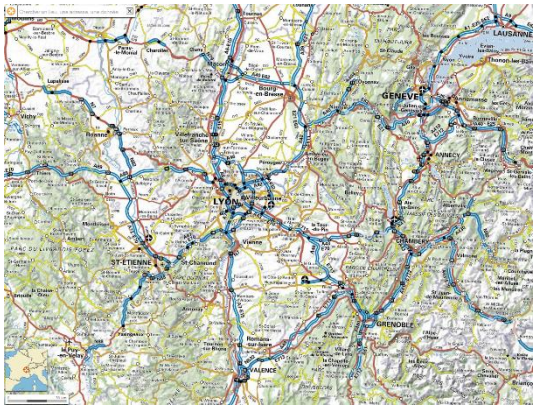


Niveau 6

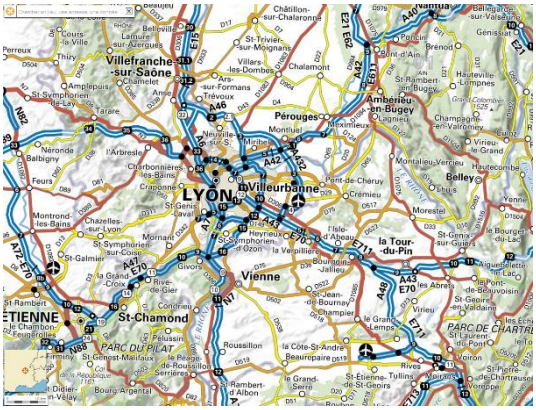
Niveau 7



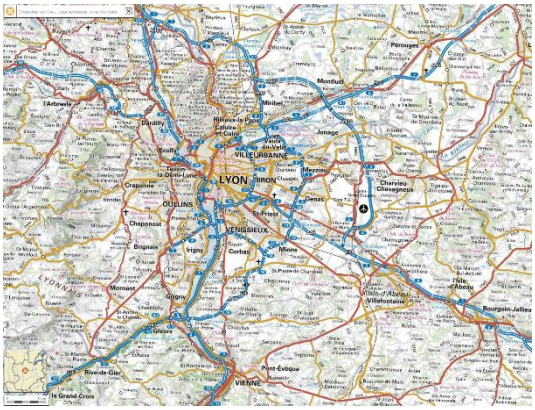
Niveau 8



Niveau 8bis

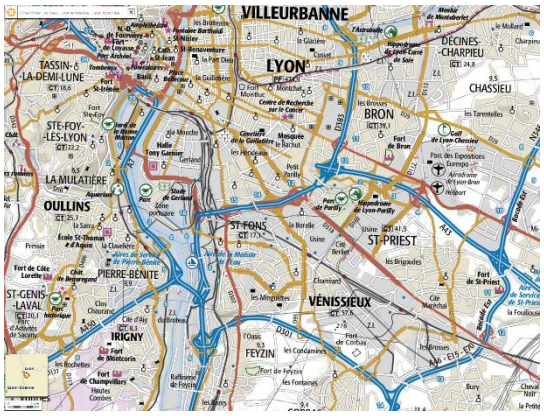


Niveau 9

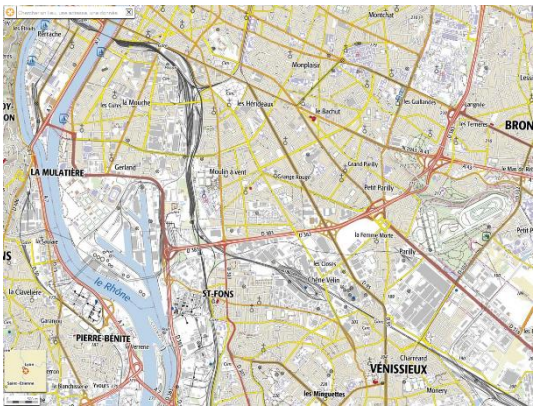


Niveau 10

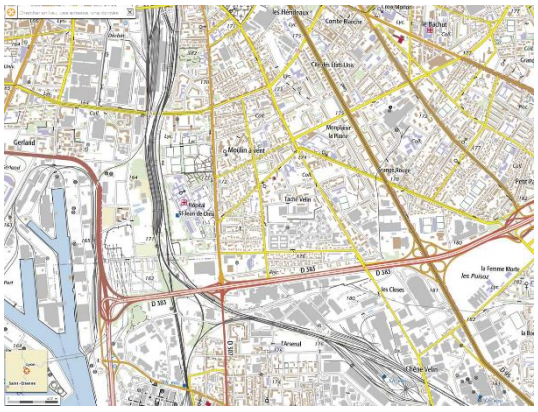
Niveau 11



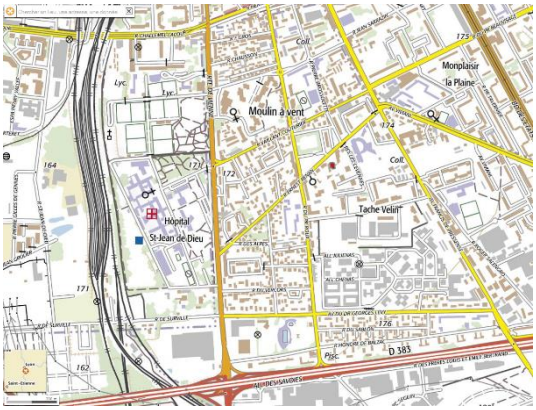
Niveau 12



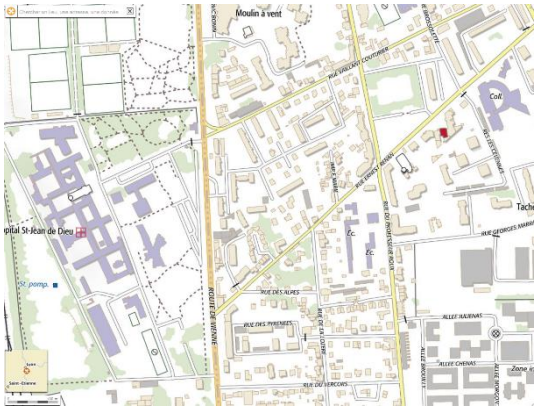
Niveau 13



Niveau 14



Niveau 15



Niveau 16

Niveau 17

9. IGN Scan

Niveau 2

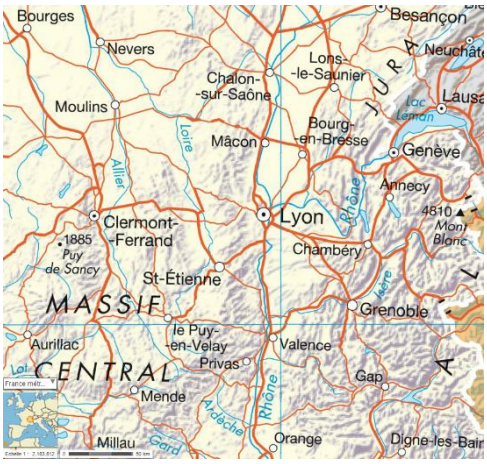
Niveau 3

Niveau 4

Niveau 5

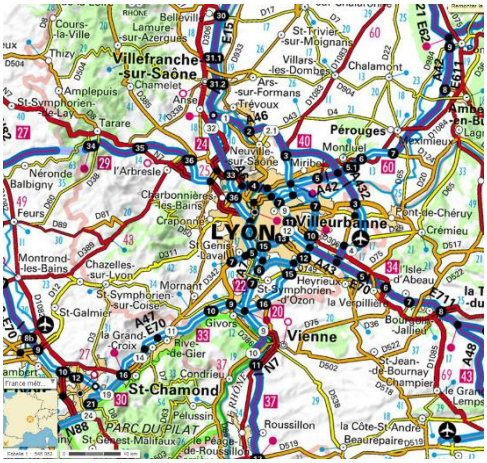
Niveau 6

Niveau 7

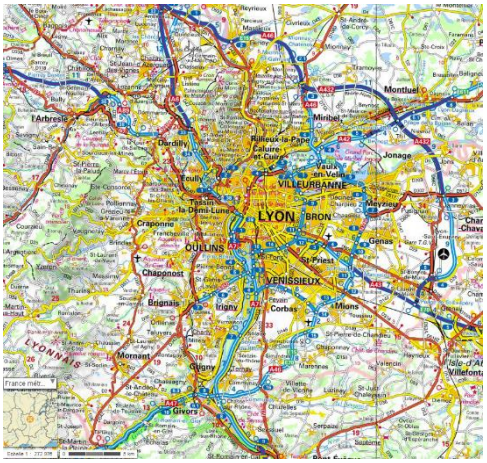


Niveau 8

Niveau 8bis

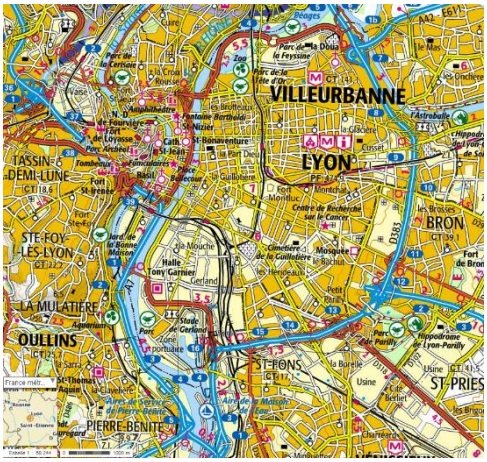


Niveau 9



Niveau 10

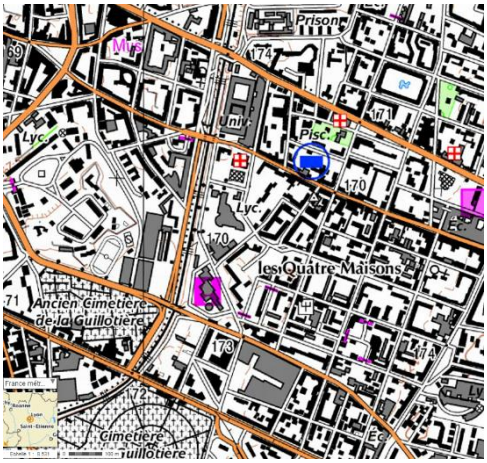
Niveau 11



Niveau 12

Niveau 13

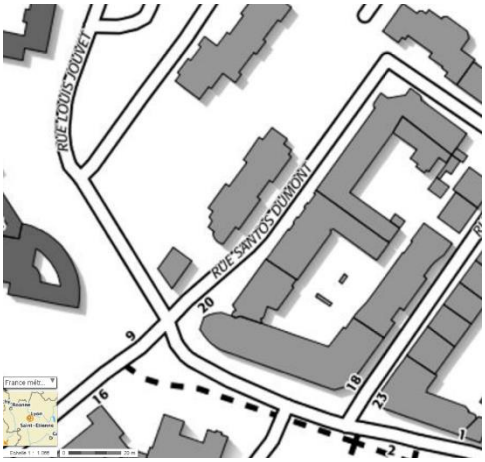
Niveau 14



Niveau 15

Niveau 16

Niveau 17



Niveau 18

Niveau 19

10.Lantmäteriet Suède

Niveau 5

Niveau 6

Niveau 7

Niveau 8

Niveau 8bis

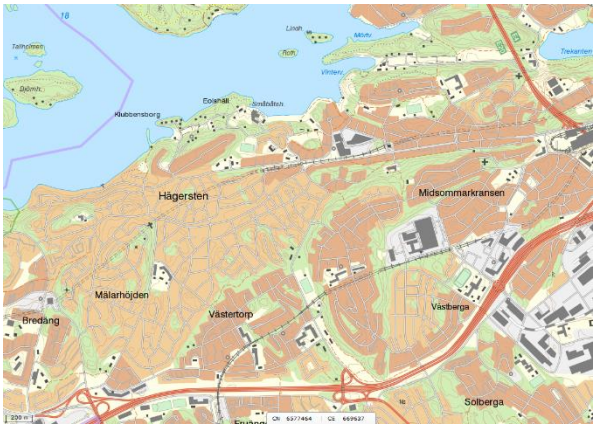
Niveau 9

Niveau 10

Niveau 11

Niveau 12

Niveau 14



Niveau 15

Niveau 16

Niveau 17

Niveau 18

Niveau 18bis

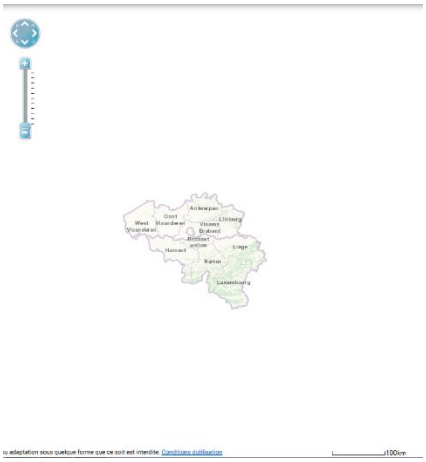
Niveau 19

Niveau 19bis

Niveau 20

Niveau 20bis

11.NGI Belgique



Niveau 8

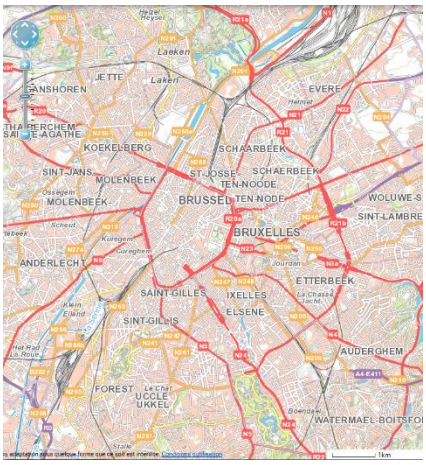
Niveau 8bis

Niveau 9

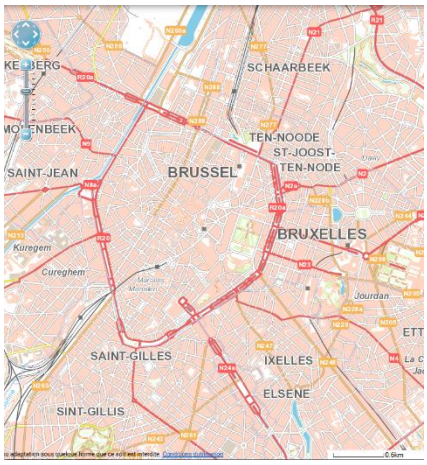
Niveau 10

Niveau 11

Niveau 12



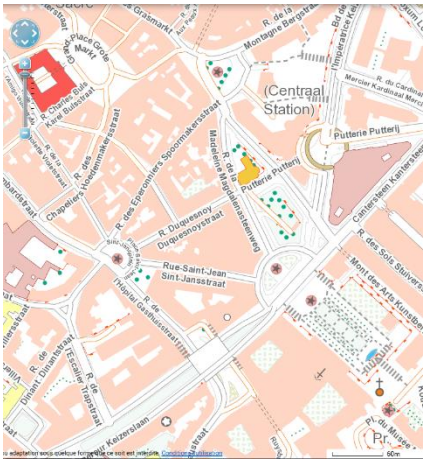
Niveau 13



Niveau 14

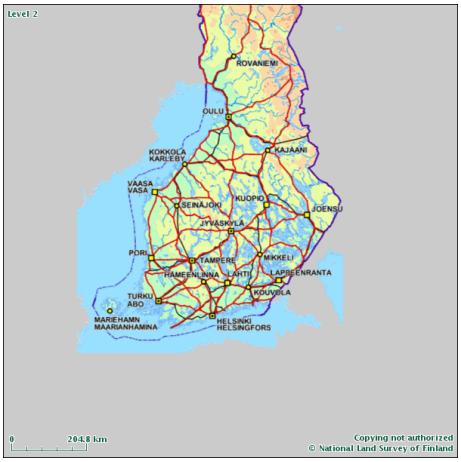
Niveau 15

Niveau 16

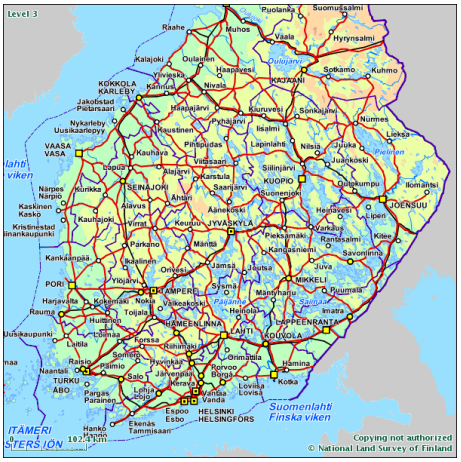


Niveau 17

12.NLS Finlande



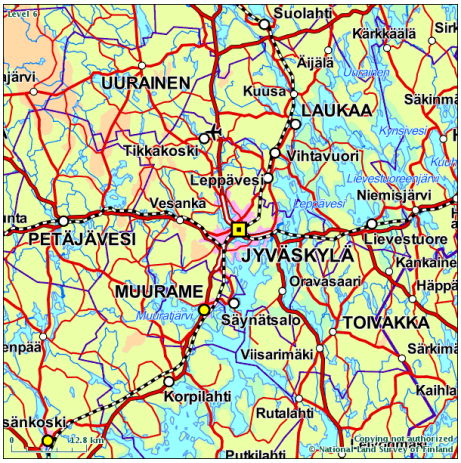
Niveau 6



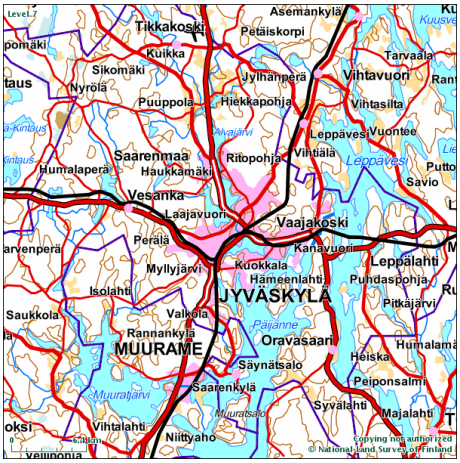
Niveau 7

Niveau 8

Niveau 8bis



Niveau 9

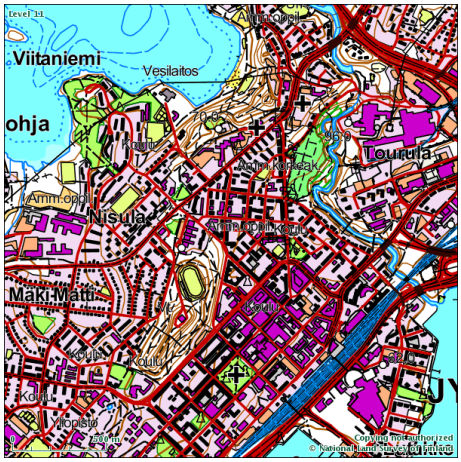


Niveau 10

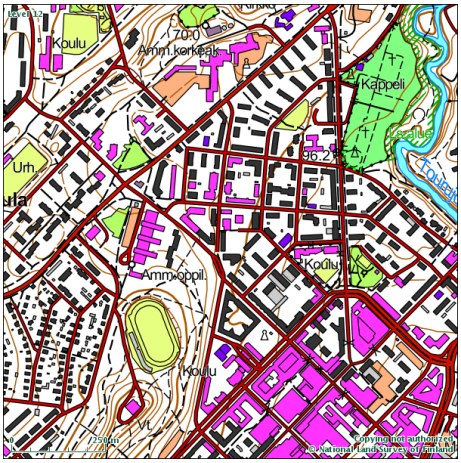
Niveau 11

Niveau 12

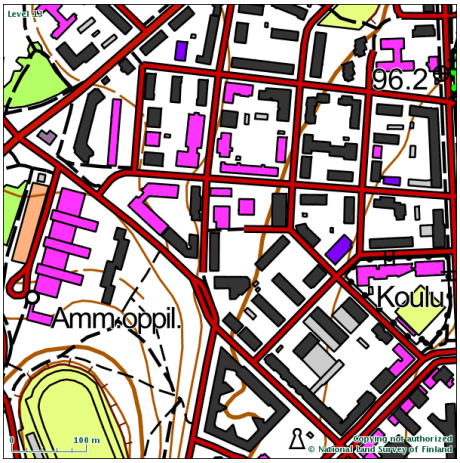
Niveau 13



Niveau 14



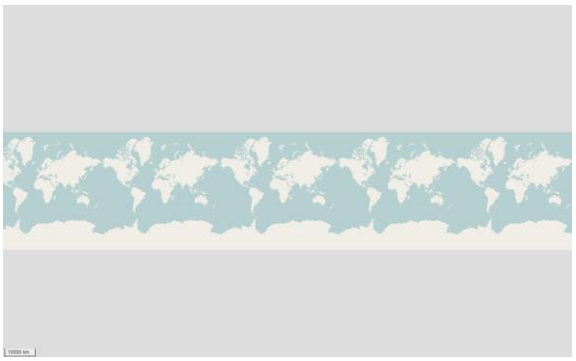
Niveau 15



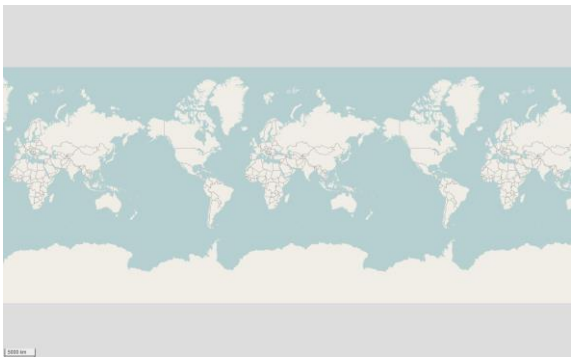
Niveau 16

Niveau 17

13.OpenStreetMap

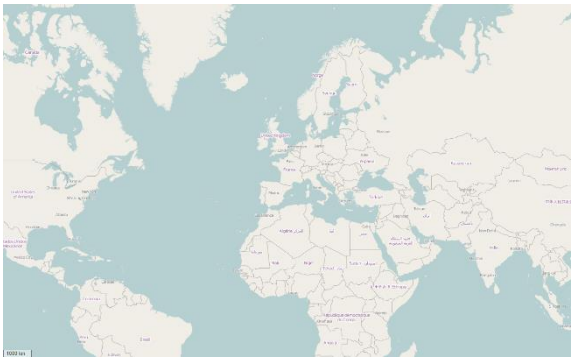


Niveau 0

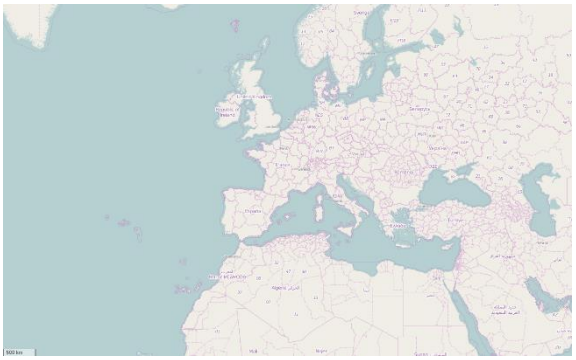


Niveau 1

Niveau 2

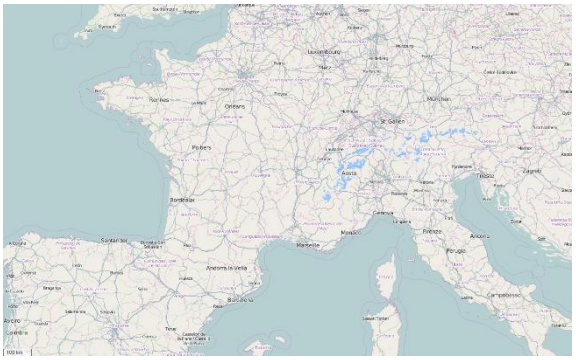


Niveau 3

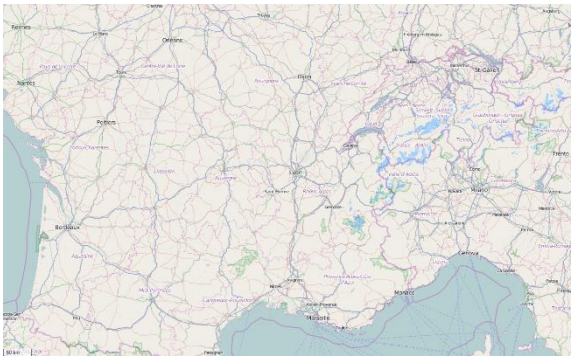


Niveau 4

Niveau 5

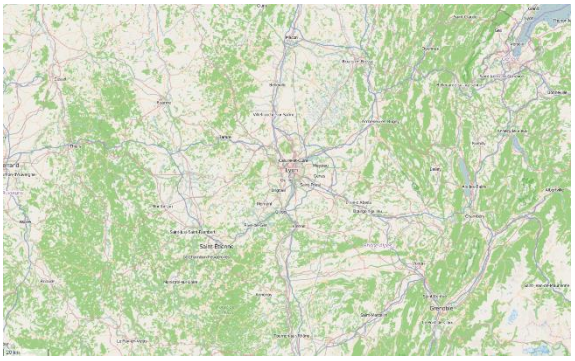


Niveau 6



Niveau 7

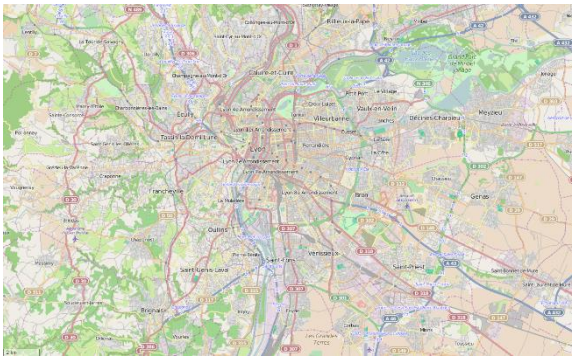
Niveau 8



Niveau 8bis

Niveau 9

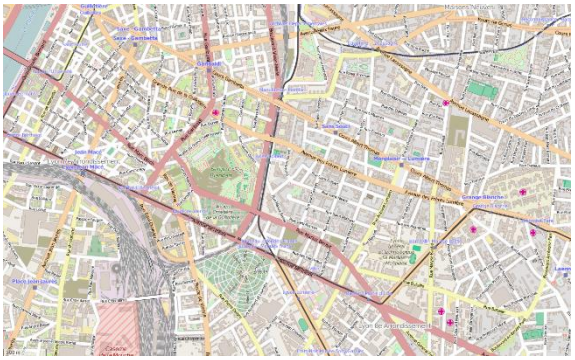
Niveau 10



Niveau 11

Niveau 12

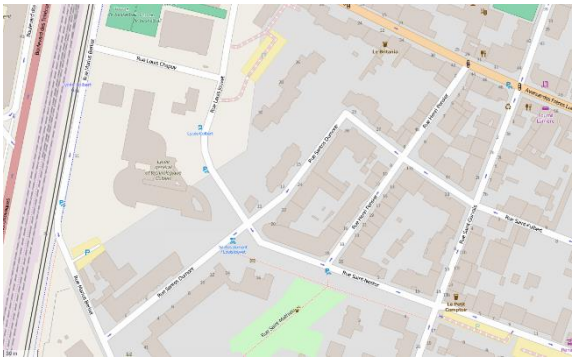
Niveau 13



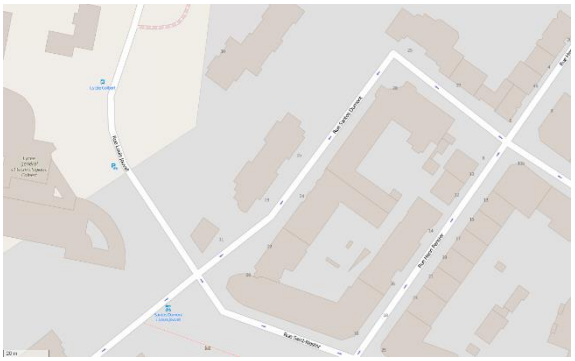
Niveau 14

Niveau 15

Niveau 16



Niveau 17



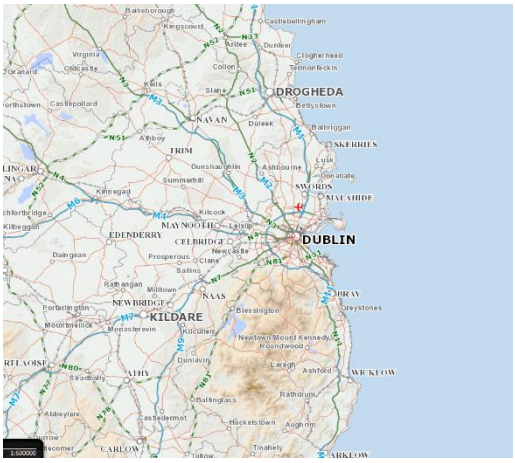
Niveau 18

14.OS Irlande

Niveau 6

Niveau 7

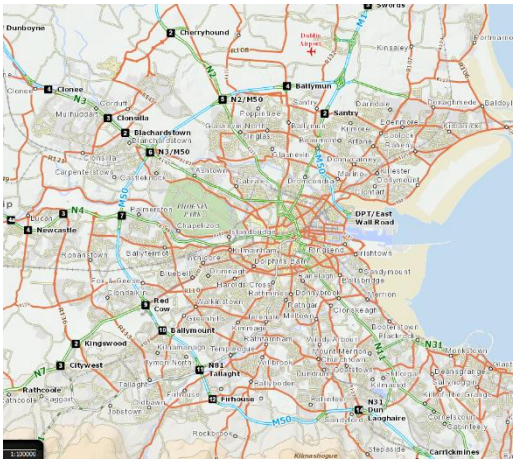
Niveau 8



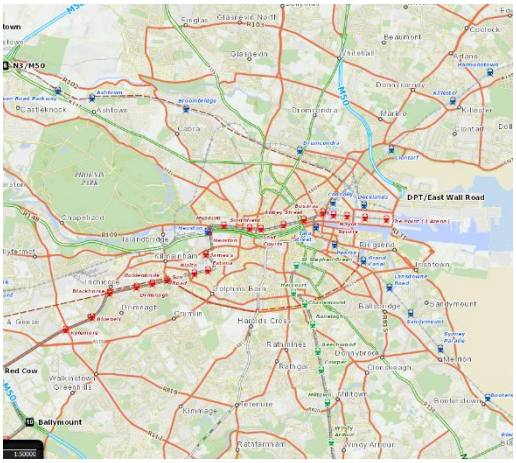
Niveau 8bis

Niveau 9

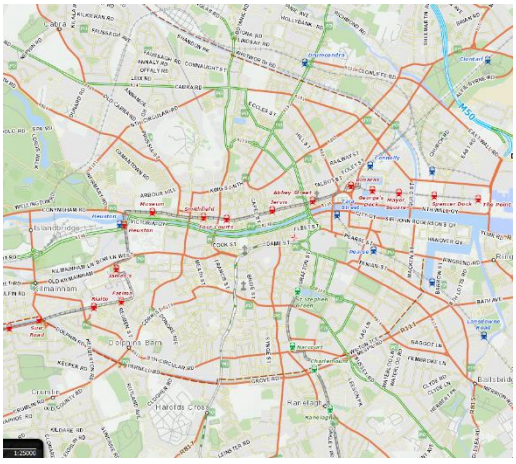
Niveau 10



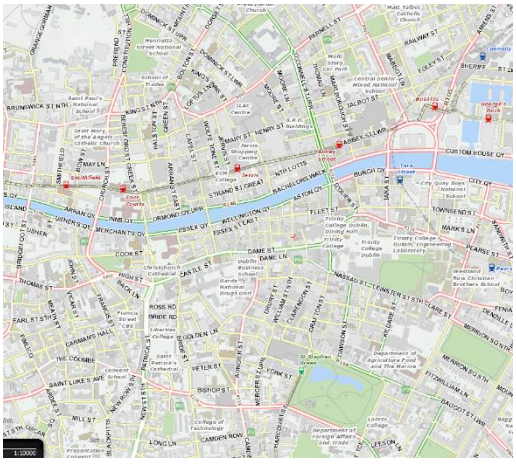
Niveau 11



Niveau 12

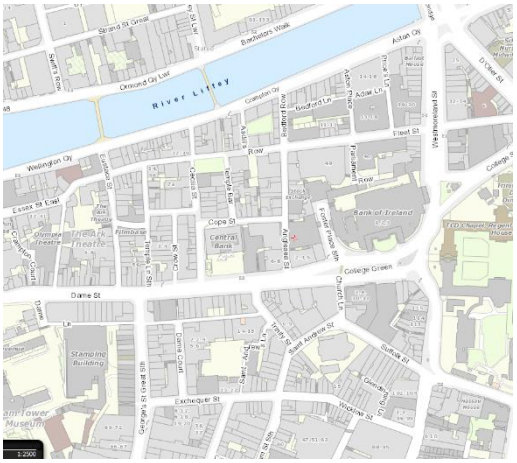


Niveau 13



Niveau 14

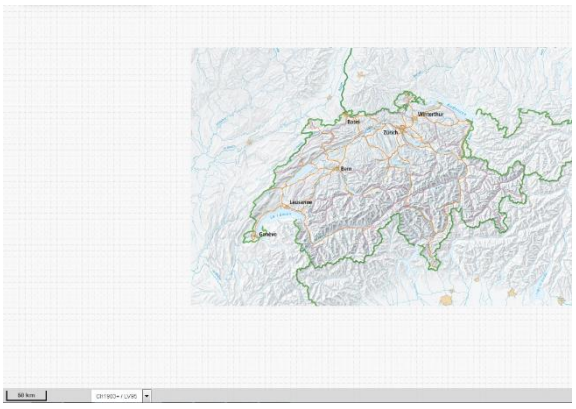
Niveau 15



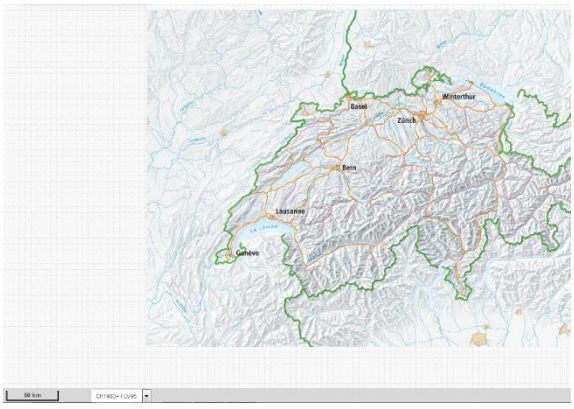
Niveau 16

Niveau 17

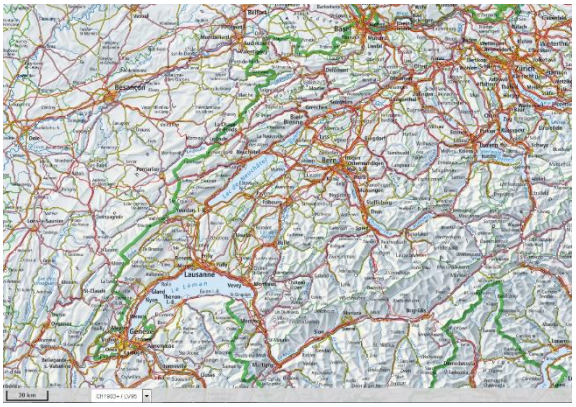
15.Swisstopo Suisse



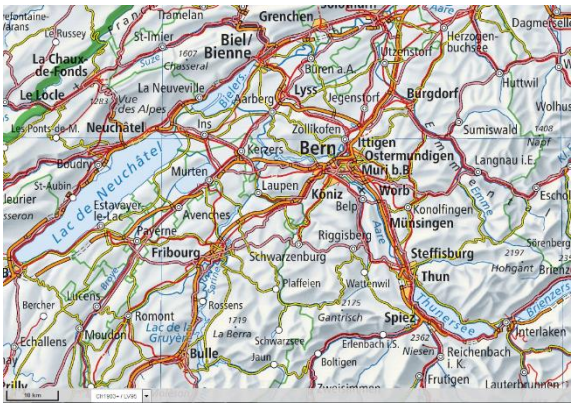
Niveau 7



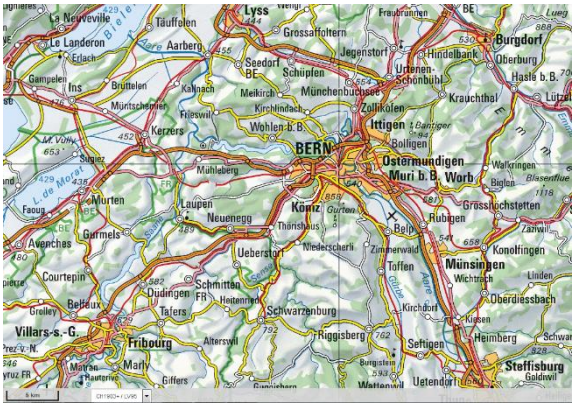
Niveau 8



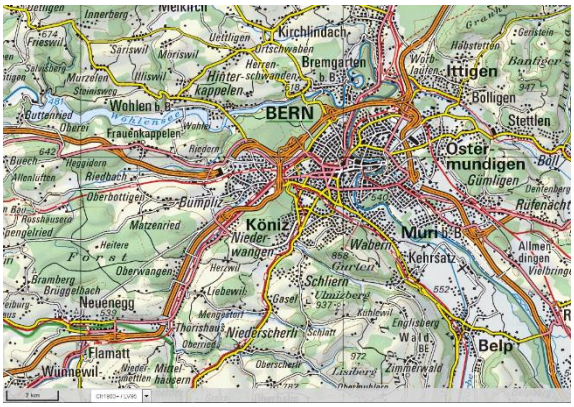
Niveau 8bis



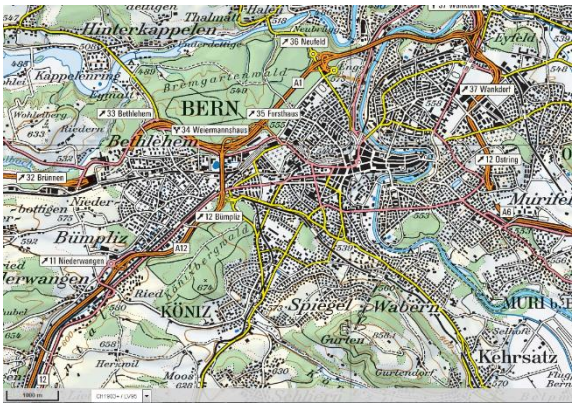
Niveau 9



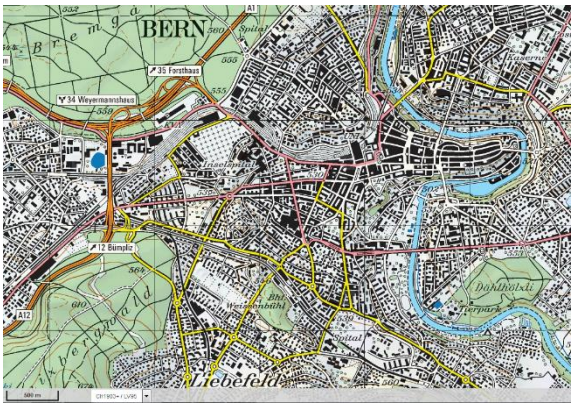
Niveau 10



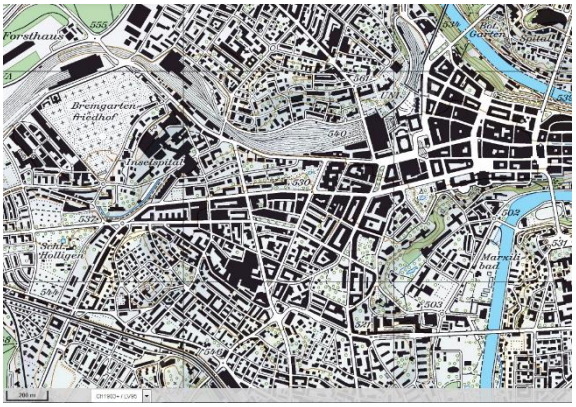
Niveau 11



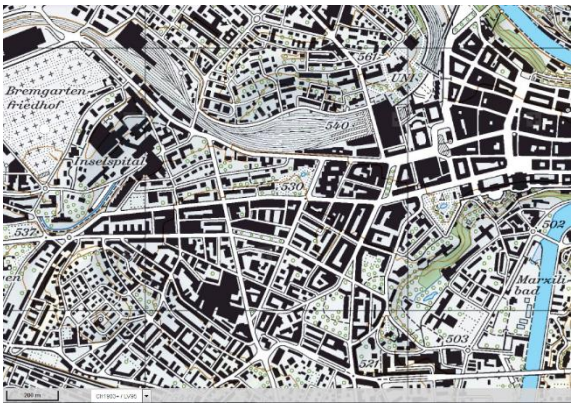
Niveau 12



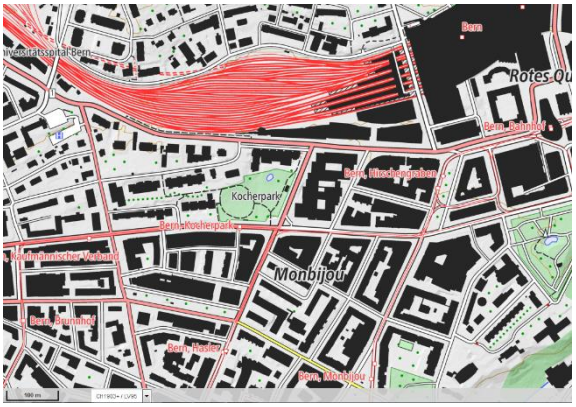
Niveau 13



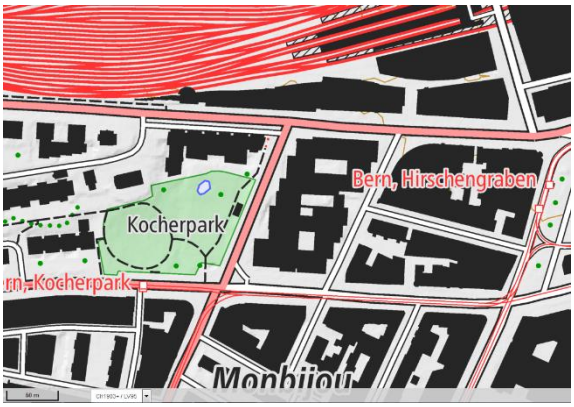
Niveau 14



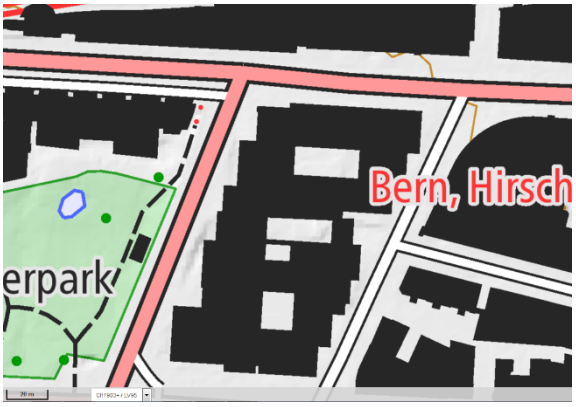
Niveau 15



Niveau 16



Niveau 17

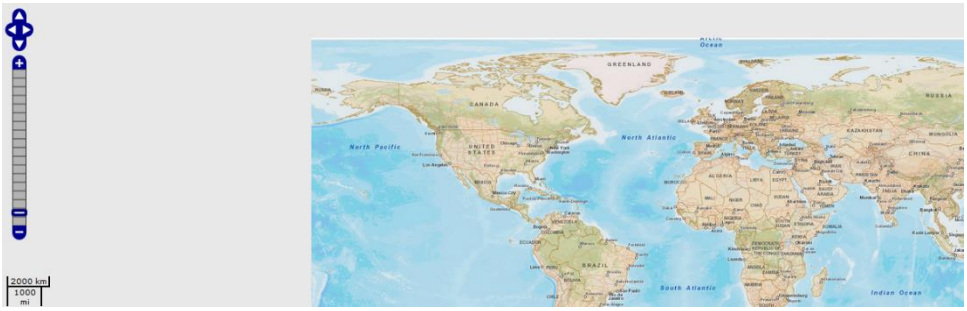


Niveau 18

Niveau 19

16.USGS États-Unis

Niveau 1



Niveau 2

Niveau 3

Niveau 4

Niveau 5

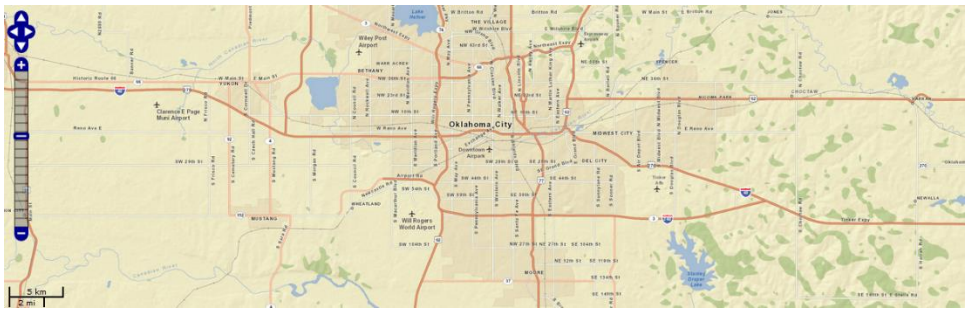
Niveau 6

Niveau 7

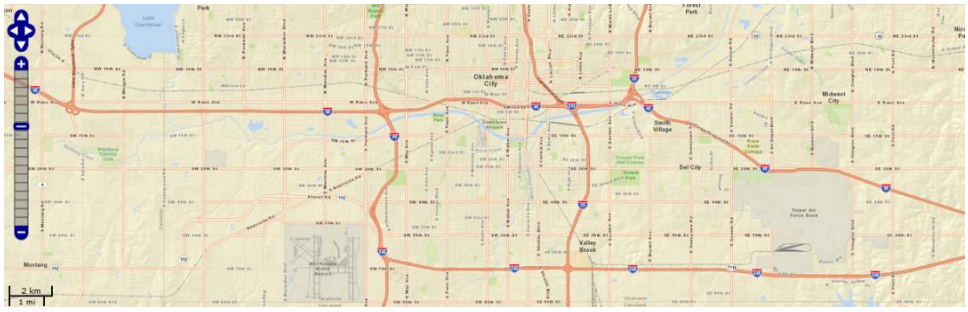
Niveau 8

Niveau 8bis

Niveau 9

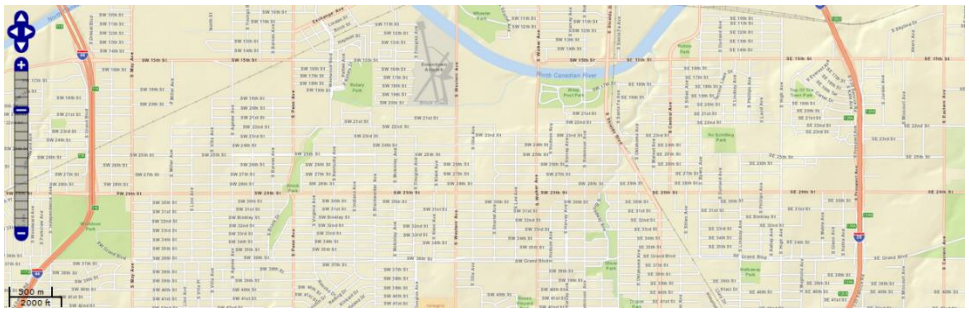


Niveau 10

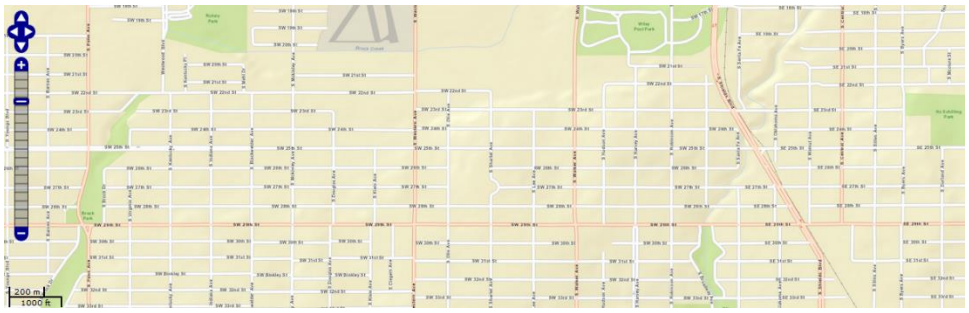


Niveau 11

Niveau 12



Niveau 13

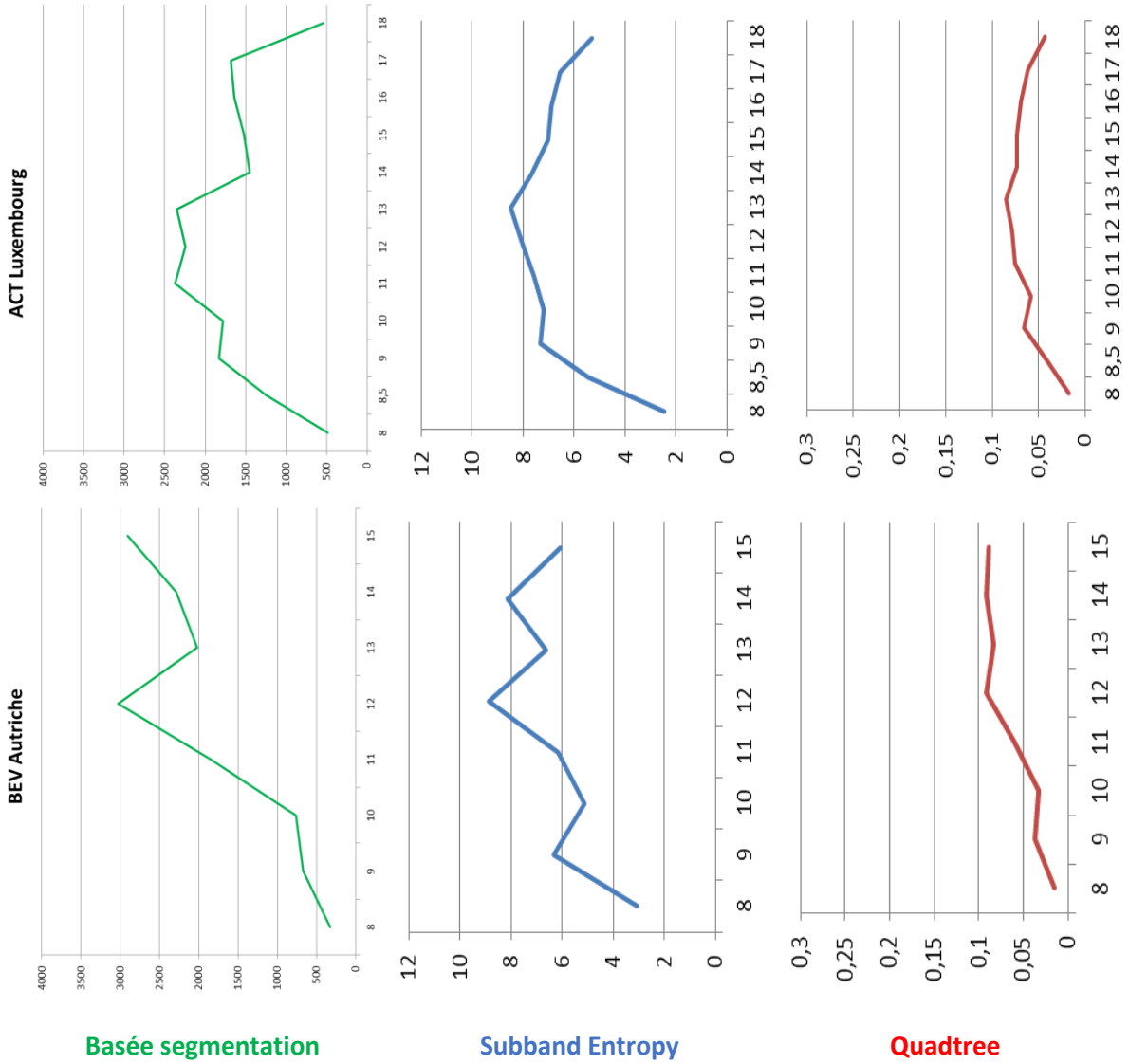


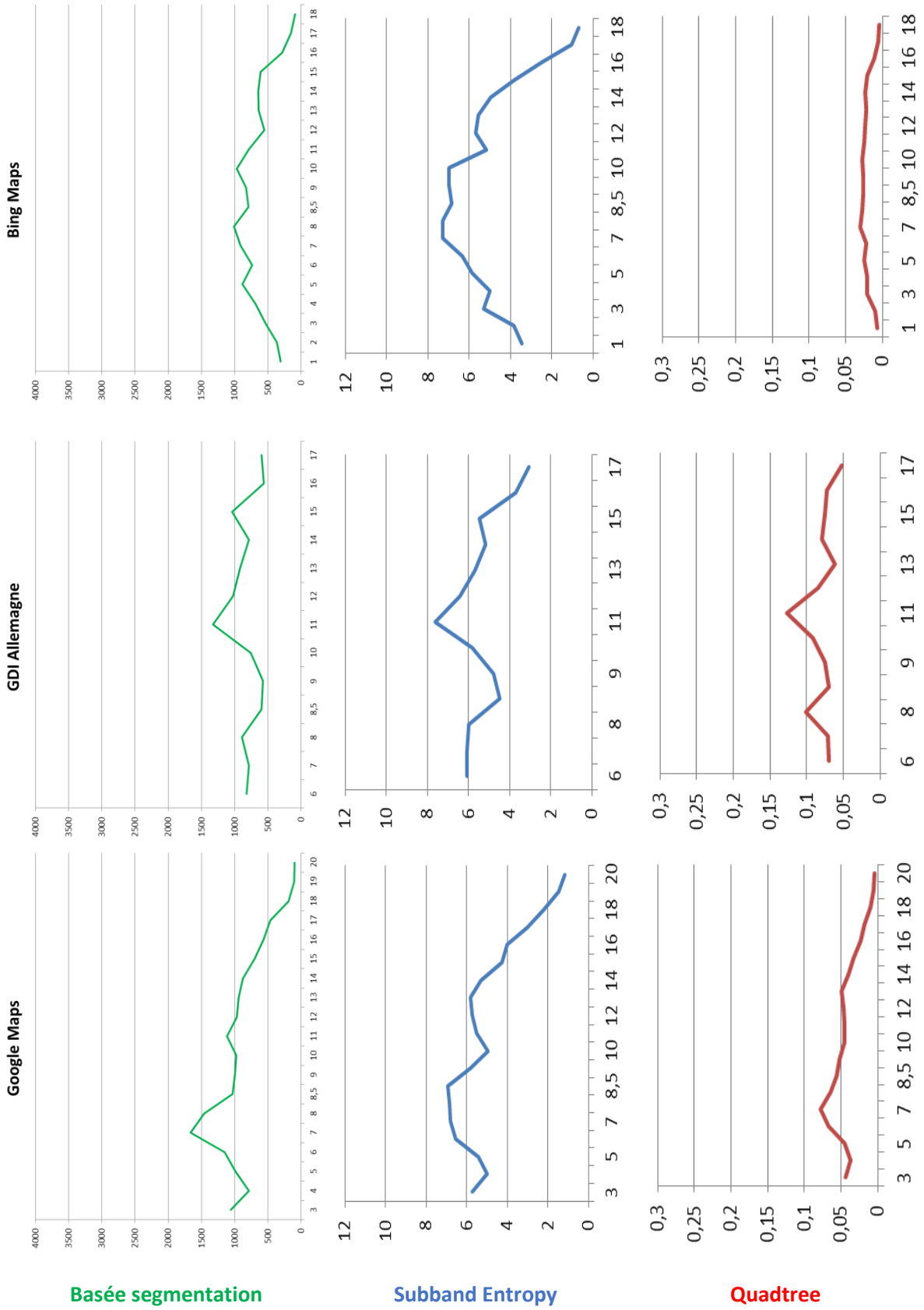
Niveau 14

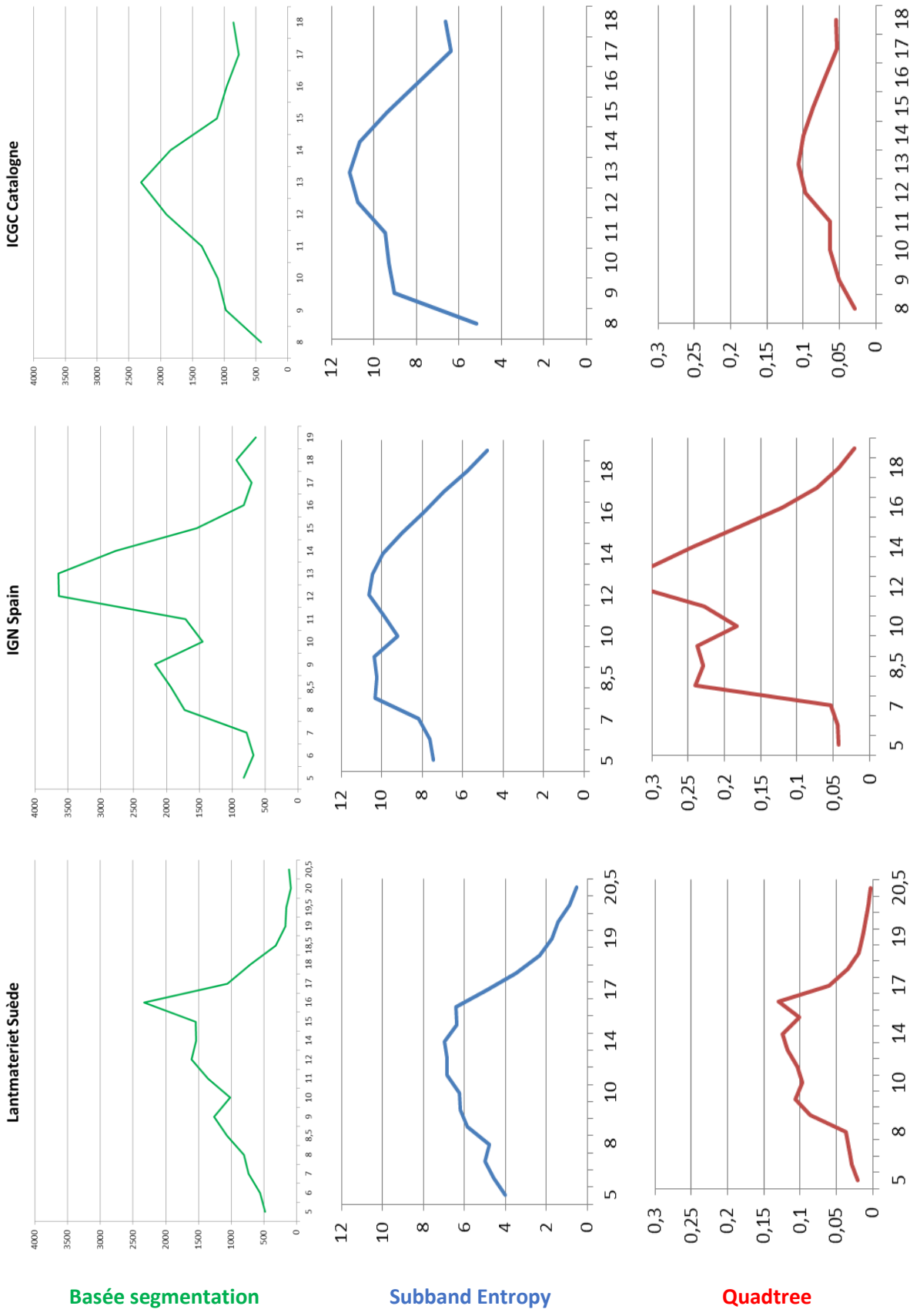
Niveau 15

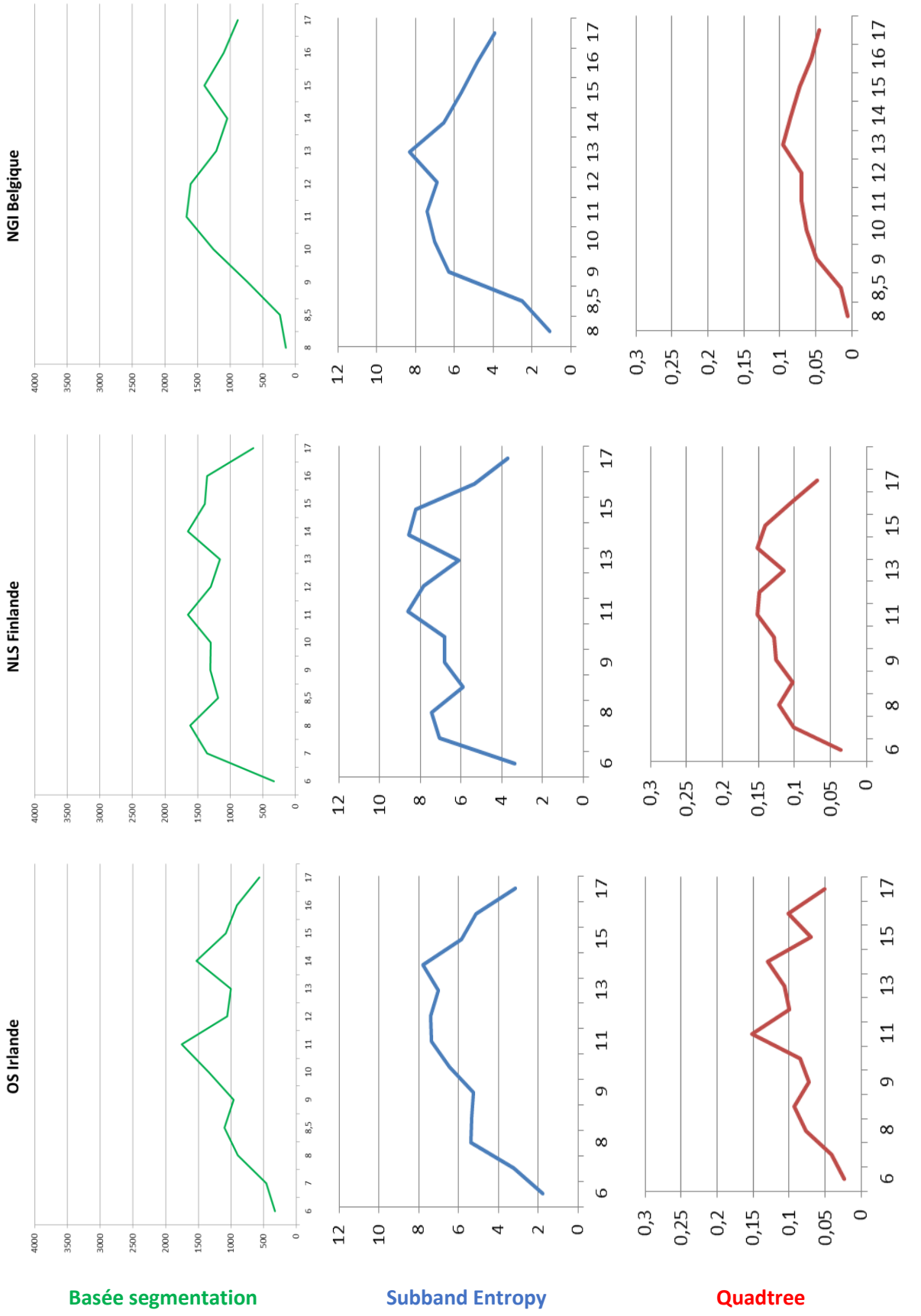
Annexe F
Mesures de Clutter

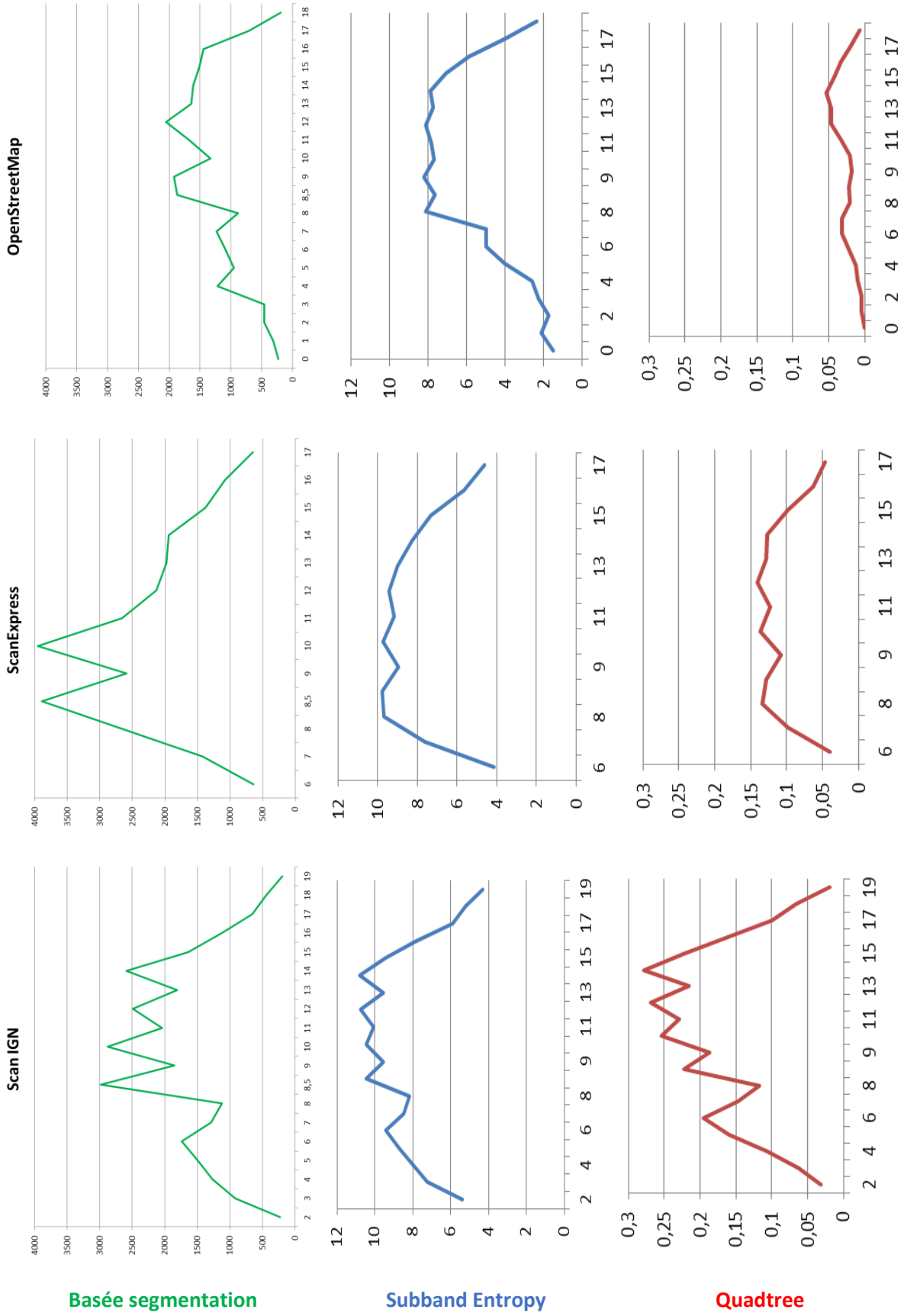
Cette annexe présente les résultats des mesures de clutter réalisées sur les pyramides existantes, présentée dans la partie §B.5. Pour chacune des pyramides, nous avons calculé trois mesures différentes sur chaque niveau de zoom, à savoir basée segmentation [Bravo et Farid, 2008], dite Subband Entropy [Rosenholtz et al., 2007] et par Quadtree [Jégou et Deblonde, 2012]. Les graphiques ci-dessous tracent l'évolution de ses mesures au fil des échelles.

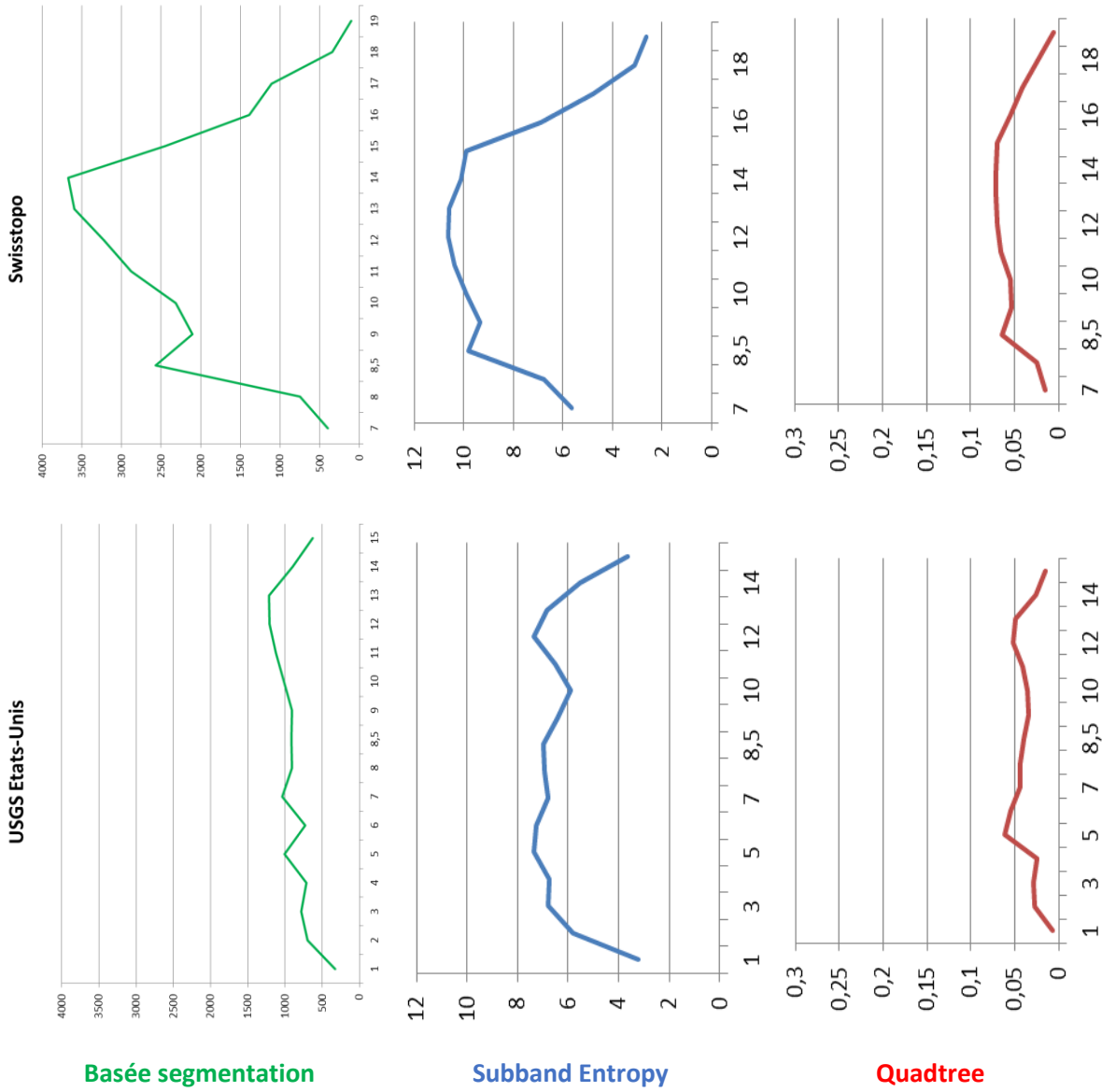



Bing Maps
GDI Allemagne
Google Maps
Basée segmentation
Subband Entropy
Quadtree


ICGC Catalogne
IGN Spain
Lantmateriet Suède
Basée segmentation
Subband Entropy
Quadtree

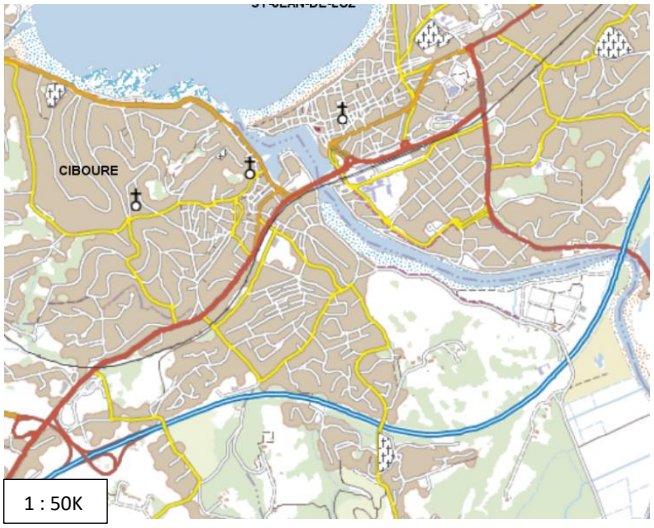

NGI Belgique
NLS Finlande
OS Irlande
Basée segmentation
Subband Entropy
Quadtree

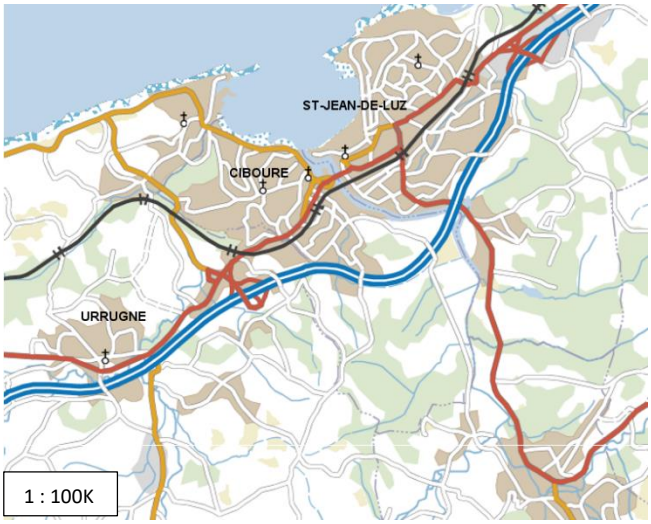

OpenStreetMap
ScanExpress
Scan IGN
Basée segmentation
Subband Entropy
Quadtree


Swisstopo
USGS Etats-Unis
Basée segmentation
Subband Entropy
Quadtree

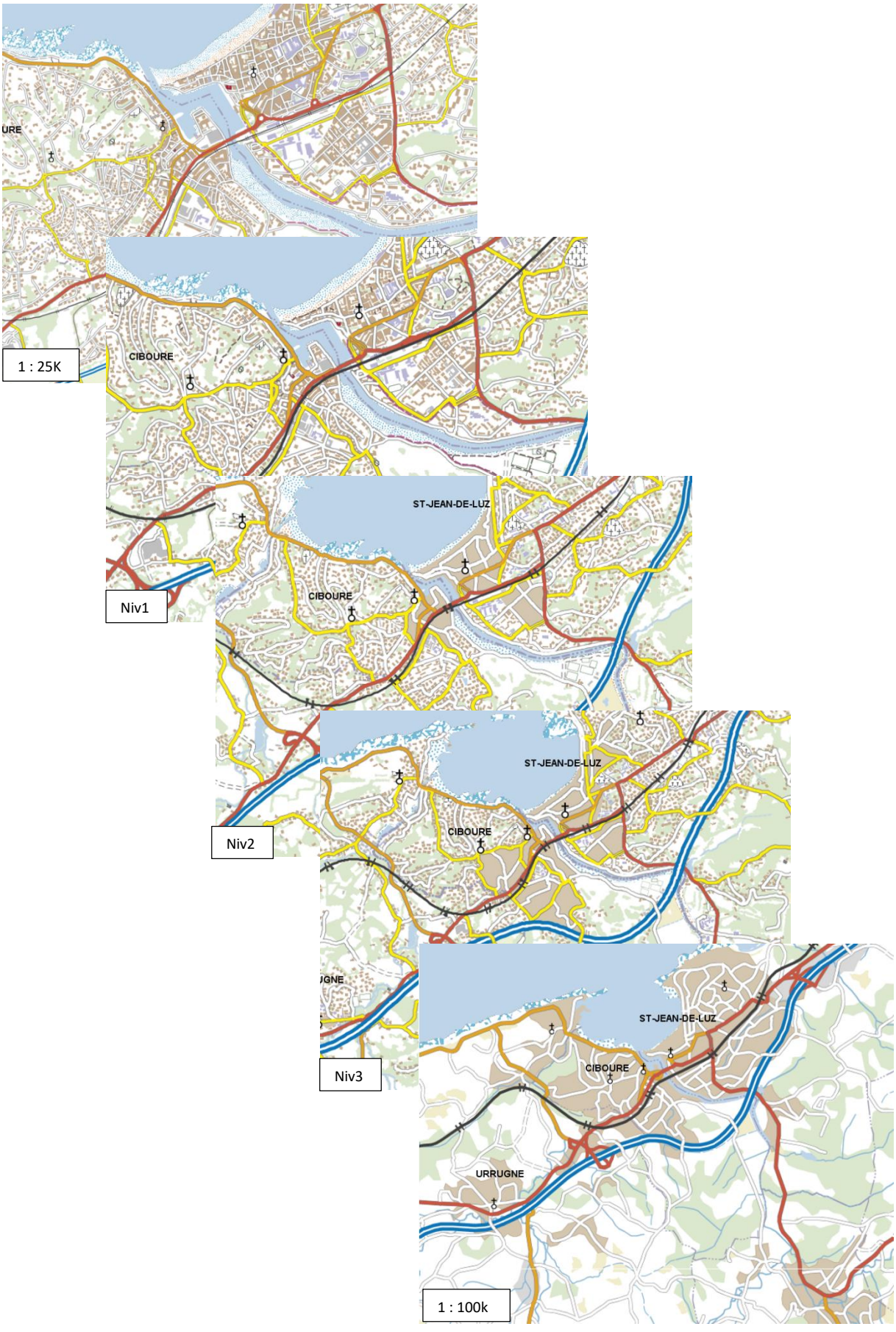
Annexe G
Extrait des pyramides produites

1. Pyramide initiale construite à partir des cartes existantes ScanExpress

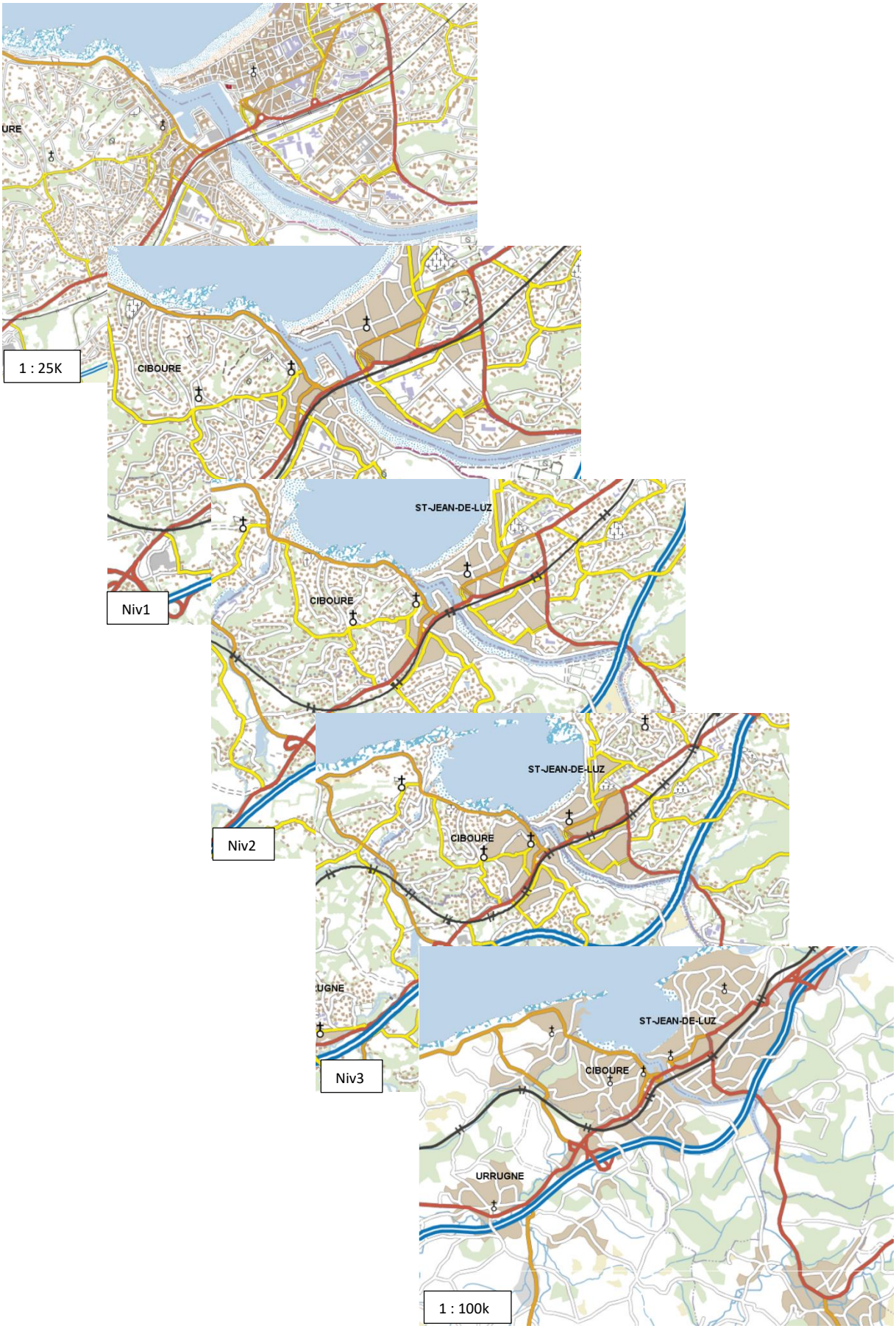




2. Pyramide construite par un processus de typification



3. Pyramide construite par les processus AGENT/CartACom



4. Pyramide construite par agrégation progressive

5. Pyramide construite par agrégation progressive avec repères visuels

Annexe H
Analyse des Tâches Cartographiques et Multi-Échelles Existantes

Référence	Variables évaluées	Tâche	Mesures utilisées	Evaluation Subjective	Procédure	Participants	Support graphique	zoom
[Brychtova et Coltekin, 2014]	influence des contrastes de couleur et de la taille de la police sur la lecture de carte	cliquer sur une unité administrative dans une carte statique	eye-tracking	-	contrôlé	50	carte avec peu de variables visuelles	non
[Burigat et Chittaro, 2011]	efficacité de différentes interfaces pour localiser des cibles distantes	interpréter les localisations et distances relatives des cibles d'après la représentation de l'interface	temps d'exécution, erreurs	-	contrôlé	24	carte simplifiée (type cadastre)	non
[Coltekin et al., 2017]	influence du réalisme sur l'apprentissage d'un itinéraire cartographique par les hommes	reconnaitre ou distinguer deux itinéraires représentés successivement par une animation	temps d'exécution, précision	coeff. de confiance	contrôlé	104	carte topo et imagerie satellite	non
[Cook et Ruddle, 2014]	identification des attributs (attractivité/simplicité) influençant le choix d'un itinéraire en fonction du type de trajet (quotidien, loisir, tourisme)	choisir l'itinéraire préféré parmi les deux proposés (attribut variable)	-	itinéraire préféré	contrôlé	73	représentation graphique en perspective	non
[Hornbaek et al., 2002]	influence de la vue d'ensemble dans l'utilisabilité d'une interface	localisation, comparaison d'objets, suivi d'itinéraires/trouver des cibles	temps d'exécution, erreurs, précision de rappel	interface préférée	contrôlé	32	carte topo avec multi-rep. des toponymes	oui
[Jakobsen et Hornbaek, 2011]	relation entre utilisabilité des méthodes d'interactions et la taille de l'écran	cliquer sur une cible/cliquer sur la cible la plus importante (valeur visible en zoomant dessus)/suivre un itinéraire en cliquant sur les intersections rencontrées	temps d'exécution, mesures de précision	effort mental	contrôlé	19	OpenStreetMap à une échelle (niv 16)	oui
[Javed et al., 2012]	efficacité d'une interface multi-focus pour la visualisation d'une représentation multi-échelle	trouver la cible finale d'un arbre de zones cibles à plusieurs niveaux/comparer des cibles distantes et identifier les paires similaires	temps d'exécution, erreurs	-	contrôlé	12	Google Maps	oui
[Lobo et al., 2015]	efficacité de différentes techniques d'interaction pour des tâches de comparaisons de cartes	trouver une cible ajoutée, supprimée ou modifier entre deux représentations carto et image	temps d'exécution, erreurs	-	contrôlé	15	carte topo et imagerie satellite	non
[Lokka et Coltekin, 2017]	quantité et type d'informations représentées dans les endroits stratégiques influencent les capacités de mémorisation d'un itinéraire	Mémoriser une séquence de navigation dans un environnement 3D et reconnaitre des éléments du parcours	exactitude du rappel	type de rep. préféré	contrôlé	42	environnement urbain en perspective	non

Référence	Variables évaluées	Tâche	Mesures utilisées	Évaluation Subjective	procédure	participants	support graphique	zoom
[Luz et Masoodian, 2014]	lisibilité de l'arrière-plan en fonction de la transparence du premier plan	lecture, interprétation du contenu cartographique	temps d'exécution, erreurs	difficulté de lecture	contrôlé	22	carte avec peu de variables visuelles	non
[Pietriga et al., 2007]	comparer l'efficacité de différentes méthodes de visualisation multi-échelle	trouver la cible parmi les points indiqués, différents uniquement à grande échelle	temps d'exécution, erreurs	-	contrôlé	12	variables visuelles élémentaires	oui
[Pindat et al., 2012]	efficacité d'une interface focus+context avec une loupe adaptée au contenu (JellyLens)	trouver une cible parmi les zones indiquées, visible uniquement à grande échelle	temps d'exécution, erreurs	-	contrôlé	12	ortho	loupe
[Plumlee et Ware, 2006]	influence de la mémoire visuelle à court-terme sur la nécessité de vues externes dans les tâches d'analyse multi-échelle	comparer des cibles distantes et identifier les paires similaires, en bloquant ou non la mémoire à court-terme (répétition de mots)	temps d'exécution, eye-tracking	-	contrôlé	20	texture graphique et variables visuelles élémentaires	oui
[Rautenbach et al., 2016]	évaluation des aptitudes utilisateurs à lire une carte topographique	lecture, interprétation du contenu cartographique	temps d'exécution, erreurs	coeff. de confiance	en ligne	49	carte topo à une échelle (1:50k)	non
[Rosenholtz et al., 2007]	évaluation de la complexité visuelle d'une représentation cartographique	trouver une cible dans l'image	temps d'exécution, erreurs	-	contrôlé	6	différentes cartes à une échelle	non
[Ruddle et al., 2015]	influence de la résolution d'affichage sur les capacités utilisateurs à trouver des cibles dans une image	trouver tous les lieux de culte sur une carte affichée sur un mur d'écran (successivement à différentes résolutions)	capteurs de mouvement (tête, souris)	-	contrôlé	13	carte topo à une échelle (1:50k)	non
[Schnur et al., 2017]	pertinence de mesures de complexité visuelle d'une représentation cartographique	évaluer la complexité visuelle d'une carte statique	-	complexité visuelle	en ligne	130	carte à différentes échelles	non
[Shupp et al., 2009]	influence de la taille d'affichage (nombre d'écrans) et de leur incurvation sur l'efficacité d'un utilisateur	trouver une cible dans l'image/suivre un itinéraire tracé et sélectionner les croisements	temps d'exécution, précision	-	contrôlé	40	imagerie satellite multi-résolution	non
[Wilson et al., 2010]	efficacité de contenu cartographique personnalisé pour la complétion de tâche d'analyse spatiale	localisation de points d'intérêt + analyse spatiale (implantation, accessibilité, etc.)	temps d'exécution, nombre d'interactions (affichage couche, pan, zoom)	-	contrôlé	20	couche de données vectorielles	oui
[Wong et al., 2015]	efficacité de représenter les emprises spatiales déjà visitées pour une tâche de fouille	En 5 min, trouver le maximum de cibles dans les zones littorales, cliquables seulement à partir d'un certain niveau de zoom	nombre de cibles trouvées, pondéré par leur difficulté	-	en ligne	100	Google Maps	oui

Annexe I
Formulaire de Consentement

J'accepte de participer à une expérience qui évalue la façon dont les gens perçoivent et utilisent la navigation interactive dans les cartes topographiques multi-échelles.

Les points suivants m'ont été expliqués :

- L'objectif de cette expérience est d'étudier la navigation interactive dans les cartes topographiques multi-échelles. Les bénéfices que je peux m'attendre à retirer de cette étude sont : (a) l'opportunité d'acquérir des connaissances sur la recherche en cartographie et les cartes topographiques multi-échelles, (b) l'opportunité de contribuer à la recherche scientifique et (c) une bonification de 3 points de vie scolaire dans le cadre de mon cursus à l'ENSG.
- Je comprends que les résultats de cette étude peuvent être soumis à publication.
- L'expérience se déroulera comme suit : pour commencer je recevrai une suite d'instructions et suivrai un tutoriel d'entrainement à une tâche précise, que l'on me demandera ensuite de réaliser plusieurs fois en conditions réelles. Enfin, je répondrai à un bref questionnaire sur le déroulement de l'expérience. La procédure entière pourra durer entre 45min et 1 heure.
- Les chercheurs responsables de l'expérience n'envisagent aucun risque relatif à ma participation à cette expérience, ni ne s'attendent à ce que je ressente un quelconque stress ou malaise.
- Je comprends que je peux me désengager de cette expérience à tout moment.
- Je comprends que je peux recevoir une copie de ce formulaire de consentement si je le demande.
- Toutes les données collectées resteront strictement confidentielles. Seules les personnes responsables de l'expérience auront accès à mes réponses. Mes réponses ne seront pas directement associées à mon nom ; à la place, mon nom sera converti en un code numérique lors du stockage des données.
- Les personnes responsables répondront à toute autre question concernant le sujet de recherche, maintenant ou au cours de l'expérience. Après avoir terminé l'expérience, je recevrai des explications concernant le raisonnement et les objectifs détaillés de cette étude.
- **Je m'engage à ne pas communiquer le déroulement de cette expérience à ses autres participants, avant la fin de l'étude.**

Nom du participant ____ Signature du Participant ____ Date ____

Nom des Responsables : Code du Participant : Age : Genre : M / F
Marion Dumont
Guillaume Touya
Cécile Duchêne

Annexe J
Questionnaire d'Auto-Évaluation des Aptitudes Spatiales (SBSOD)

Ce questionnaire est constitué de plusieurs affirmations concernant vos préférences, expériences et aptitudes spatiales. Pour chaque affirmation, entourez un chiffre pour indiquer à quel point vous êtes d'accord : de 1 pour « pas du tout d'accord » à 7 pour « tout à fait d'accord ». Entourez 4 si vous n'êtes ni d'accord, ni pas d'accord.

- **Je suis très doué pour indiquer une direction.**

Pas du tout d'accord 1 2 3 4 5 6 7 *Tout à fait d'accord*

- **J'ai généralement une mauvaise mémoire de l'endroit où je laisse un objet.**

Pas du tout d'accord 1 2 3 4 5 6 7 *Tout à fait d'accord*

- **Je suis très doué pour évaluer les distances.**

Pas du tout d'accord 1 2 3 4 5 6 7 *Tout à fait d'accord*

- **J'ai un très bon sens de l'orientation.**

Pas du tout d'accord 1 2 3 4 5 6 7 *Tout à fait d'accord*

- **J'ai tendance à penser à mon environnement en termes de directions Nord, Sud, Est, Ouest.**

Pas du tout d'accord 1 2 3 4 5 6 7 *Tout à fait d'accord*

- **Je me perds très facilement dans une nouvelle ville.**

Pas du tout d'accord 1 2 3 4 5 6 7 *Tout à fait d'accord*

- **J'aime lire des cartes.**

Pas du tout d'accord 1 2 3 4 5 6 7 *Tout à fait d'accord*

- **J'ai des difficultés à comprendre les indications directionnelles.**

Pas du tout d'accord 1 2 3 4 5 6 7 *Tout à fait d'accord*

- **Je suis très doué pour lire les cartes.**

Pas du tout d'accord 1 2 3 4 5 6 7 *Tout à fait d'accord*

- **Je ne mémorise pas très bien la route lorsque je voyage en voiture en tant que passager.**

Pas du tout d'accord 1 2 3 4 5 6 7 *Tout à fait d'accord*

- **Je n'aime pas indiquer une direction.**

Pas du tout d'accord 1 2 3 4 5 6 7 *Tout à fait d'accord*

- **Ce n'est pas important pour moi de savoir où je suis.**

Pas du tout d'accord 1 2 3 4 5 6 7 *Tout à fait d'accord*

- **Je laisse généralement quelqu'un d'autre planifier l'itinéraire pour les longs voyages.**

Pas du tout d'accord 1 2 3 4 5 6 7 *Tout à fait d'accord*

- **Je peux généralement me rappeler un nouveau trajet après ne l'avoir suivi qu'une fois.**

Pas du tout d'accord 1 2 3 4 5 6 7 *Tout à fait d'accord*

- **Je n'ai pas une très bonne « carte mentale » de mon environnement.**

Pas du tout d'accord 1 2 3 4 5 6 7 *Tout à fait d'accord*

Annexe K
Introduction et Démonstration du Test

Introduction

Nous allons commencer ce test par quelques explications sur son objectif, puis je te ferai une démonstration de l'exercice à réaliser. Tu pourras ensuite t'entrainer sur 5 exercices avant de passer aux 15 exercices chronométrés. Le tout devrait te prendre entre 45 minutes et une heure.

Cette expérience porte sur l'utilisation d'une carte topographique multi-échelle, c'est-à-dire une suite de cartes à différentes échelles, comme celles que tu peux retrouver sur Google Maps ou le Géoportail de l'IGN. Dans cette carte multi-échelle, on peut donc naviguer, en se déplaçant dans la carte ou en changeant de niveau de zoom. Le contenu de la carte peut alors changer en fonction de l'échelle.

Dans cette expérience, tu vas devoir naviguer dans une carte multi-échelle pour réaliser un exercice. A la plus grande échelle (lorsque l'on a zoomé au maximum), tu devras cliquer dans l'ordre sur tous les points violets traversés par un itinéraire, que l'on te donne uniquement sur la carte à plus petite échelle (lorsque l'on a dézoomé au maximum). Tu devras réaliser plusieurs fois cette tâche, avec différents itinéraires et différentes cartes multi-échelles. A chaque exercice, tu devras réaliser cette tâche le plus rapidement possible, tout en faisant le moins d'erreurs possible. Je vais maintenant faire une démonstration en te montrant comment réaliser cet exercice, puis tu pourras t'entrainer avant de passer aux exercices mesurés.

Démonstration (réalisation d'une tâche exemple par l'instructeur en direct)

Quand l'exercice commence, tu ne vois que le point de départ de l'itinéraire (en vert), et les points sur lesquels tu devras cliquer en violet. **Pour trouver le point d'arrivée de l'itinéraire (en rouge), il faut dézoomer.** Les points violets disparaissent, car ils ne sont visibles qu'au zoom maximum.

Pour découvrir l'itinéraire, tu **devras passer la souris sur le bouton « *Itinéraire* »**, en haut à droite, mais attention, il ne peut pas toujours être affiché : il n'est disponible qu'à partir d'une certaine échelle lorsque l'on dézoome : l'apparence du bouton « *Itinéraire* » en haut à droite de l'écran indique quand l'affichage de l'itinéraire est disponible (violet foncé).

Regarde bien la forme de l'itinéraire. Tu dois aller retrouver dans l'ordre tous les points traversés par l'itinéraire. **Pour afficher les points violets à nouveau, il faut zoomer au maximum**.

Lorsque tu **cliques sur les points**, leur couleur indique si c'est une bonne réponse ou non. Si tu cliques bien sur les points dans le bon ordre, ils passent en vert et la partie correspondante de l'itinéraire se dessine en violet. Si le point passe en vert temporairement, il est bien sur l'itinéraire mais ce n'était pas le prochain. Si le point est rouge, alors ce point n'était pas sur l'itinéraire et tu as fait une erreur. Si tu n'as pas bien vu la couleur, tu peux cliquer plusieurs fois sur le point, les erreurs ne sont compter qu'une fois.

Pour suivre ta progression, un **compteur** en haut à gauche de l'écran indique le nombre de points trouvés sur le nombre de points total ainsi que ton nombre d'erreurs. Tu auras aussi en haut le

numéro de l'exercice, pour savoir où tu en es.

Si tu te rappelles de la suite de l'itinéraire, tu peux **cliquer sur les points suivants**. Sinon, il suffit d'aller le **consulter à nouveau**. Pour cela, tu dois dézoomer, passer ta souris sur le bouton *Itinéraire*, puis zoomer pour retrouver les points, et ainsi de suite jusqu'à la fin de l'itinéraire.

Lorsque tu as cliqué sur tous les points de l'itinéraire, il faudra **cliquer sur le point d'arrivée** (en rouge) : s'il est validé, l'itinéraire apparait alors en violet foncé et le chronomètre s'arrête.

Instructions annexes

Si tu souhaites **faire une pause**, tu peux le faire après avoir cliqué sur le point d'arrivée. Si tu es prêt à faire l'exercice suivant, tu peux cliquer sur le bouton Suivant. Une nouvelle carte s'affiche et le chronomètre démarre immédiatement.

Si tu en as besoin, la **légende** de la carte est ici (Annexe M).

Pendant l'expérience, n'hésite pas à réagir à haute voix, car la manière dont tu réfléchis et réalises l'exercice m'intéresse aussi. Je prendrai des notes pendant ce temps-là.

Entrainement

Nous allons maintenant passer à 5 exercices **d'entrainement**, puis nous ferons une pause avant de passer au test réel. Pendant l'entrainement, n'hésite pas à me poser des questions. Par contre, pendant le test je ne pourrais plus intervenir. As-tu des questions avant de commencer l'entrainement ?

Annexe L
Évaluation Subjective

Ce questionnaire est constitué de plusieurs affirmations concernant le déroulement de votre expérience. Répondez le plus honnêtement possible. Pour chaque affirmation, entourez un chiffre pour indiquer à quel point vous êtes d'accord : de 1 pour « pas du tout d'accord » à 7 pour « tout à fait d'accord ». Entourez 4 si vous n'êtes ni d'accord, ni pas d'accord.

- **Je n'ai jamais éprouvé de difficulté à résoudre la tâche demandée.**

Pas du tout d'accord 1 2 3 4 5 6 7 *Tout à fait d'accord*

- **Pour réaliser la tâche demandée, j'ai adopté la même méthode pour tous les exercices.**

Pas du tout d'accord 1 2 3 4 5 6 7 *Tout à fait d'accord*

- **Certains exercices m'ont semblé plus faciles à résoudre.**

Pas du tout d'accord 1 2 3 4 5 6 7 *Tout à fait d'accord*

- **Pour réaliser la tâche demandée, j'ai mémorisé une ou plusieurs parties de l'itinéraire.**

Pas du tout d'accord 1 2 3 4 5 6 7 *Tout à fait d'accord*

- **Je ne connaissais pas du tout cette zone géographique.**

Pas du tout d'accord 1 2 3 4 5 6 7 *Tout à fait d'accord*

- **Tous les itinéraires étaient aussi difficiles les uns que les autres.**

Pas du tout d'accord 1 2 3 4 5 6 7 *Tout à fait d'accord*

- **J'ai souvent eu du mal à me repérer dans la carte après avoir zoomé/dézoomé.**

Pas du tout d'accord 1 2 3 4 5 6 7 *Tout à fait d'accord*

- **Pour réaliser la tâche demandée, j'ai suivi des points de repères sur la carte.**

Pas du tout d'accord 1 2 3 4 5 6 7 *Tout à fait d'accord*

- **J'ai éprouvé des difficultés à me servir de l'interface de navigation.**

Pas du tout d'accord 1 2 3 4 5 6 7 *Tout à fait d'accord*

- **Pour réaliser la tâche demandée, je me suis beaucoup servi de l'itinéraire-source.**

Pas du tout d'accord 1 2 3 4 5 6 7 *Tout à fait d'accord*

Enfin :

- **Quels types de points de repère avez-vous utilisés ?**

- **Combien de cartes multi-échelles différentes avez-vous pu identifier ?**

Annexe M
Légende des Cartes Multi-Échelles

Constructions et Equipements

- Bâtiment d'habitation
- Zone d'habitation
- Bâtiment industriel
- Zone industrielle
- Bâtiment public
- Bâtiment historique
- Mairie
- Eglise
- Terrains de sports
- Cimetières

Réseaux de Transports

- Autoroutes
- Routes Principales
- Routes Régionales
- Routes Locales
- Autres routes
- Routes en construction
- Chemins
- Sentiers
- Pistes Cyclables
- Voies ferrées

Végétation

- Forêts Fermées, Bois
- Forêts Ouvertes, Zones Arborées
- Landes Ligneuses
- Vignes, Vergers
- Sable Sec
- Sable Humide, Vase
- Rochers

Hydrographie

- Surfaces d'Eau
- Tronçons Hydrographiques

Limites Administratives

- Limites de Commune
- Frontières entre Etats

Références

AFT (2000) *Lexique Topographique 1991-2000*, Association Française de Topographie (Ed.), 126p.

Alvina, J., Appert, C., Chapuis, O., Pietriga, E. (2014) RouteLens: Easy route following for map applications. In *Proceedings of the 2014 International Working Conference on Advanced Visual Interfaces,* ACM, pp. 125-128.

Anderson, L.W. et Krathwohl, D.R. (2001) *A Taxonomy for Learning, Teaching, and Assessing: A Revision of Bloom's Taxonomy of Educational Objectives*. Allyn & Bacon. Boston, MA (Pearson Education Group).

Baenninger, M. et Newcombe, N. (1989) The role of experience in spatial test performance: A meta-analysis. Sex roles, 20(5-6), pp. 327-344.

Balley, S. et Regnauld, N. (2011) Models and standards for on-demand mapping. In *Proceedings of the 25th International Cartographic Conf*erence. Paris, France.

Balley, S., Baella, B., Christophe, S., Pla, M., Regnauld, N., Stoter, J. (2014) Map specifications and user requirements. In *Abstracting Geographic Information in a Data Rich World,* Springer International Publishing, pp. 17-52.

Bard, S. (2004) *Méthode d'évaluation de la qualité de données géographiques généralisées: Application aux données urbaines*, Thèse de doctorat, Université Paris 6, France.

Bard, S. et A. Ruas (2004) Why and How evaluating generalised data?. In *Proceedings of the 13th International Symposium on Spatial Data Handling*.

Barrault, M., Regnauld, N., Duchêne, C., Haire, K., Baeijs, C., Demazeau, Y., Hardy, P., Mackaness, W.A., Ruas, A., Weibel, R. (2001) Integrating multi-agent, object-oriented, and algorithmic techniques for improved automated map generalisation. In *Proceedings of 20th International Cartographic Conference*, pp. 2110–2116. Beijing, China.

Batson, C.D. (1987) Prosocial motivation: Is it ever truly altruistic?. In *Advances in experimental social psychology*, *20*, pp. 65-122.

Beard, K. (1991) Constraints on rule formation. *Map generalization: making rules for knowledge representation*, pp. 121-135.

Bederson, B. et Hollan, J. (1994) Pad++: a zooming graphical interface for exploring alternate interface physics. In *Proceedings of the 7th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 17-26.

Béguin, M. et Pumain, D. (2010) *La représentation des données géographiques: Statistique et cartographie*. Armand Colin.

Bereuter, P. (2015) *Quadtree-based real-time point generalisation for web and mobile mapping*. Thèse de doctorat, Université de Zurich.

Bereuter, P., Weibel, R., Burghardt, D. (2012) Content zooming and exploration for mobile maps. In *Proceedings of the 15th AGILE international conference on geographic information science.* pp. 74-80.

Bertin, J. (1967) *Sémiologie graphique: les diagrammes, les réseaux, les cartes*. Paris, École des hautes études en sciences sociales/Mouton-Gauthier-Villars.

Bessadok, F. (2015) *Modèle pour l'évaluation et l'amélioration de la lisibilité d'une carte géographique*, Thèse de doctorat, Université Paris Est, France.

Bildirici, I. O., Aslan, S., Simav, O., & Cobankaya, O. N. (2011) A generic approach to building typification. In *14th ICA workshop on generalisation and multiple representation*, Paris. Vol. 30.

Bjørke, J. (2003) Generalization of road networks for mobile map services: an information theoretic approach. In *Proceedings of the 21st International Cartographic Conference (ICC)*. Paris, France.

Bobzien, M., Burghardt, D., Petzold, I. (2005) Re-generalisation and construction—Two alternative approaches to automated incremental updating in MRDB. In *Proceedings of 22nd International Cartographic Conference. La Coruña, Spain*.

Bobzien, M., Burghardt, D., Petzold, I., Neun, M., Weibel, R. (2008) Multi-representation databases with explicitly modeled horizontal, vertical, and update relations. *Cartography and Geographic Information Science*, *35*(1), pp. 3-16.

Boér, A., Çöltekin, A., Clarke, K. (2013) An Evaluation of Web-based Geovisualizations for Different Levels of Abstraction and Realism–What do users predict?. In *Proceedings of the* 26th *International Cartographic Conference*, pp. 209-220. Dresden, Allemagne.

Boffet, A. (2001) *Méthode de création d'informations multi-niveaux: pour la généralisation cartographique de l'urbain*. Thèse de doctorat, Université de Marne-la-Vallée.

Bol, D., Grus, M., Laakso, M. (2016) Crowdsourcing and VGI in National Mapping agency's Data Collection. In *Proceedings of the 6th International Conference on Cartography and GIS*, p. 493.

Brassel, K.E. et Weibel, R. (1988) A review and conceptual framework of automated map generalization. *International Journal of Geographical Information System*, *2*(3), pp. 229-244.

Bravo, M. J. et Farid, H. (2008) A scale invariant measure of clutter. *Journal of Vision*, *8*(1), pp. 23-23.

Brewer, C.A. (2003) A transition in improving maps: The ColorBrewer example. *Cartography and Geographic Information Science*, *30*(2), pp. 159-162.

Brewer, C.A. et Buttenfield, B.P. (2007) Framing guidelines for multi-scale map design using databases at multiple resolutions. *Cartography and Geographic Information Science*, *34*(1), pp. 3-15.

Bruns, B., Stoter, J. E., Nijhuis, R., Bulder, J., Van Altena, V., Van Smaalen, J. (2011) Feasibility study on an automated generalisation production in line for multiscale topographic products. In *Proceedings of the 14th Workshop of the ICA Commission on Generalisation and Multiple*

Representation & the ISPRS Commission II/2 Working Group on Multiscale Representation of Spatial Data: Geographic Information on Demand, Paris.

Brychtova, A. et Çöltekin, A. (2014) An empirical user study for measuring the influence of colour distance and font size in map reading using eye tracking. *The cartographic journal*, *53*(3), pp. 202-212.

Brychtová, A., Çöltekin, A., Pásztob, V. (2016) Do the visual complexity algorithms match the generalization process in geographical displays? In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *41*.

Bucher, B., Brasebin, M., Buard, E., Grosso, E., Mustière, S., Perret, J. (2012) Geoxygene: Built on top of the expertise of the french NMA to host and share advanced GI science research results. *Geospatial free and open source software in the 21st century*, pp. 21-33.

Burghardt, D. et Cecconi, A. (2007) Mesh simplification for building typification. In *International Journal Geographic Information Science*, 21(3), pp. 283–298.

Burigat, S. et Chittaro, L. (2011) Visualizing references to off-screen content on mobile devices: A comparison of Arrows, Wedge, and Overview+ Detail. *Interacting with Computers*, 23(2), pp. 156-166.

Buttenfield, B.P. (1995) Object-oriented map generalization: modeling and cartographic considerations. In *GIS and generalization: metodology and practice,* pp. 91-105. Müller, JC., Lagrange, JP., Weibel, R. (Eds.). Londres: Taylor & Francis.

Buttenfield, B.P., Stanislawski, L.V., Brewer, C.A. (2011) Adapting generalization tools to physiographic diversity for the United States National Hydrography Dataset. *Cartography and Geographic Information Science*, *38*(3), pp. 289-301.

Card, S.K. (2008) « Information Visualization ». In *The Human-Computer Interaction Handbook: Fundamentals, Evolving Technologies and Emerging Applications*, Sears, A. et Jacko J.A. (Eds.), pp. 509-543. Lawrence Erlbaum Associates.

Carter, J.R. (2005) The many dimensions of map use. In *Proceedings of the 22th International Cartographic Conference*, La Coruña, Espagne.

Cecconi, A. et Galanda, M. (2002) Adaptive zooming in web cartography. In *Computer Graphics Forum*, 21(4), pp. 787-799. Blackwell Publishing, Inc.

CFC (1970) Glossaire Français de Cartographie, dans le *Bulletin du Comité Français de Cartographie*, 46.

Chimani, M., van Dijk, T.C., Haunert, J.-H., (2014) How to Eat a Graph: Computing Selection Sequences for the Continuous Generalization of Road Networks. In *Proceedings of the 22nd ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems*, pp. 243–252. New York, NY, USA.

Christophe, S., Duménieu, B., Turbet, J., Hoarau, C., Mellado, N., Ory, J., Loi, H., Masse, A., Arbelot, B., Vergne, R., Brédif, M., Hurtut, T., Thollot, J., Vanderhaeghe, D. (2016) Map style

formalization: rendering techniques extension for cartography. In *Expressive 2016 The Joint Symposium on Computational Aesthetics and Sketch-Based Interfaces and Modeling and Non-Photorealistic Animation and Rendering*, pp. 59-68. The Eurographics Association.

Clavien, L. et Bétrancourt, M. (2003) Animations multimédia: quels dispositifs pour réduire la charge cognitive?. Journée EPIQUE.

Collier, P., Pearson, A., Forrest, D. (1998) The representation of topographic information on maps–vegetation and rural land use. *The Cartographic Journal*, 35(2), pp. 190-197.

Collier, P., Forrest, D., Pearson, A. (2003) The representation of topographic information on maps–the depiction of relief. *The Cartographic Journal*, 40(1), pp. 17-26.

Çöltekin, A. (2015) Mix well before use: Understanding the key ingredients of user studies. In *Proceedings of Workshop "Envisioning the future of cartographic user research",* Curitiba, Brazil.

Çöltekin, A., Heil, B., Garlandini, S., Fabrikant, S.I. (2009) Evaluating the Effectiveness of Interactive Map Interface Designs: A Case Study Integrating Usability Metrics with Eye-movement Analysis. *CaGIS - Cartography and Geographic Information Science*, 36, pp. 5–17.

Çöltekin, A., Francelet, R., Richter, K.F., Thoresen, J., Fabrikant, S.I. (2017) The effects of visual realism, spatial abilities, and competition on performance in map-based route learning in men. *Cartography and Geographic Information Science*, pp. 1-15.

Cook, S. et Ruddle, R.A. (2014) Effect of simplicity and attractiveness on route selection for different journey types. In *International Conference on Spatial Cognition*, pp. 190-205. Springer, Cham.

Couclelis, H., Golledge, R.G., Gale, N., Tobler, W. (1987) Exploring the anchor-point hypothesis of spatial cognition. Journal of Environmental Psychology, 7(2), pp. 99-122.

Crampton, J.W. (2010) Maps 2.0: map mashups and new spatial media. In *Mapping: A Critical Introduction to Cartography and GIS*, pp. 25-38.

Cuenin, R. (1972) *Cartographie générale: Notions générales et principes d'élaboration*. Eyrolles.

Danciger, J., Devadoss, S., Mugno, J., Sheehy, D., Ward, R. (2009) Shape deformation in continuous map generalization. *GeoInformatica*, 13, pp. 203–221.

Das, T., van Elzakker, C. P. J. M., Kraak, M. J. (2012) Conflicts in neogeography maps. In *Proceedings of AutoCarto 2012*.

David, B. et Fasquel, P. (1997) Qualité d'une base de données géographique: concepts et terminologie, *Bulletin d'Information de l'IGN, 67*.

Davies, C., Fabrikant, S.I., Hegarty, M. (2015) *Towards empirically verified cartographic displays.* In *The Cambridge Handbook of Applied Perception Research*, pp. 711-729, Hoffman, R., Hancock, P., Scerbo, M., Parasuraman, R., Szalma, J. Cambridge University Press, New York.

Davis, F.D. (1989) Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. *MIS quarterly*, pp. 319-340.

Denègre, J. et Salgé, F. (2004) Aspects non technologiques des SIG et prospective. *Que sais-je?*, *2*(3122), pp. 111-123.

Devogèle, T., Parent, C., Spaccapietra, S. (1998) On spatial database integration. *International Journal of Geographical Information Science*, 12, pp. 335–352.

Dilo, A., van Oosterom, P., Hofman, A. (2009) Constrained tGAP for generalization between scales: The case of Dutch topographic data. *Computers, Environment and Urban Systems*, 33, pp. 388–402.

Duchêne, C. (2004) *Généralisation Cartographique par Agents Communicants: le modèle CartACom*. Thèse de doctorat, spécialité Informatique, Université Paris 6, France.

Duchêne, C., Ruas, A., Cambier, C. (2012) The CartACom model: transforming cartographic features into communicating agents for cartographic generalisation. *International Journal of Geographical Information Science*, 26(9), pp. 1533-1562.

Duchêne, C., Baella, B., Brewer, C., Burghardt, D., Buttenfield, B., Gaffuri, J., Käuferle, D., Lecordix, F., Maugeais, E., Nijhuis, R., Pla, M., Post, M., Regnauld, N., Stanislawski, L., Stoter, J., Tóth, K., Urbanke, S., van Altena, V., Wiedemann, A. (2014) Generalisation in Practice Within National Mapping Agencies, In *Abstracting Geographic Information in a Data Rich World*, Burghardt, D., Duchêne, C., Mackaness, W. (Eds.), Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Springer International Publishing, pp. 329–391.

Dumont, M., Touya, G., Duchêne, C. (2015) Automated Generalisation of Intermediate Levels in a Multi-Scale Pyramid, *Proceedings of 18th ICA Workshop on Generalisation and Multiple Representation*. Rio de Janeiro, Brazil.

Dumont, M., Touya, G., Duchêne, C. (2016a) Assessing the Variation of Visual Complexity in Multi-Scale Maps with Clutter Measures, *Proceedings of AGILE workshop on "Automated generalisation for on-demand mapping" and 19th ICA Workshop on Generalisation and Multiple Representation*. Helsinki, Finland.

Dumont, M., Touya, G., Duchêne, C. (2016b) A Comparative Study of Existing Multi-Scale Maps: What Content at Which Scale?, *Proceedings of the 9th International Conference on Geographic Information Science (GIScience 2016)*, pp. 92-95.

Ehrliholzer, R. (1995) Quality assessment in generalization: integrating quantitative and qualitative methods. In *Proceedings of the 17th International Cartographic Conference*, pp. 2241-2250.

Elias, B. (2003) Extracting landmarks with data mining methods. In *International Conference on Spatial Information Theory*, pp. 375-389. Springer, Berlin, Heidelberg.

Fabrikant, S.I., Rebich-Hespanha, S., Andrienko, N., Andrienko, G., Montello, D.R. (2008) Novel method to measure inference affordance in static small-multiple map displays representing dynamic processes. *The Cartographic Journal*, 45(3), pp. 201–215.

Fabrikant, S.I., Christophe, S., Papastefanou, G., Maggi, S. (2012) Emotional response to map design aesthetics. In *Proceedings of the GIScience Conference 2012*, pp. 18-21. Columbus, Ohio, USA.

Fairbairn, D. (2006) Measuring Map Complexity. *The Cartographic Journal*, 43(3), pp. 224–238.

Felzenszwalb, P. et Huttenlocher, D. (2004) Efficient graph-based image segmentation. *International Journal of Computer Vision*, 59(2), pp. 167–181.

Foerster, T., Stoter, J.E., Koebben, B., van Oosterom, P. (2007) A Generic Approach to Simplification of Geodata for Mobile Applications. In *Proceedings of 10th AGILE International Conference on Geographic Information Science*, Wachowicz, M., Bodum, L. (Eds.). Aalborg University, Denmark.

Foerster, T., Stoter, J., Kraak, M.-J. (2010) Challenges for automated generalisation at European mapping agencies: a qualitative and quantitative analysis. *The Cartographic Journal*, 47, pp. 41–54

Forrest, D., Pearson, A., Collier, P. (1997) The representation of topographic information on maps–the coastal environment. *The Cartographic Journal*, 34(2), pp. 77-85.

Frei, P., Richter, K.F., Fabrikant, S.I. (2016) Stress supports spatial knowledge acquisition during wayfinding with mobile maps. In *Proceedings of the International Conference on GIScience* (Short Paper). Montréal, Canada.

Gaffuri, J. (2012) Toward Web Mapping with Vector Data, In *Geographic Information Science*, Lecture Notes in Computer Science, Xiao, N., Kwan, M.-P., Goodchild, M., Shekhar, S. (Eds.). Springer Berlin Heidelberg, pp. 87–101.

Girres, J.-F. et Touya, G. (2014) Cartographic Generalisation Aware of Multiple Representations, In *Proceedings of GIScience 2014 - Poster Session*, Duckham, M., Stewart, K., Pebesma, E. (Eds.). Vienna, Austria.

Golledge, R.G. (1992) Place recognition and wayfinding: Making sense of space. *Geoforum*, 23(2), pp. 199-214.

Gonzalez, C. (1996) « Does animation in user interfaces improve decision making? ». In *Proceedings of ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI)*, ACM, pp. 27-34. Vancouver, Colombie-Britannique, Canada.

Goodchild, M.F. (2007) Citizens as sensors: the world of volunteered geography. *GeoJournal*, *69*(4), pp. 211-221.

Gould, N. (2012) Semantic description of generalisation web services for on-demand mapping, In *Proceedings 1st AGILE PhD School*, pp. 38–48, Pundt, H., Bernard, L. (Eds.). Shaker Verlag.

Griffin, A.L., MacEachren, A.M., Hardisty, F., Steiner, E., Li, B. (2006) A comparison of animated maps with static small-multiple maps for visually identifying space-time clusters. *Annals of the Association of American Geographers*, 96(4), pp. 740–753.

Grosso, E. (2004) *Etude des carrefours d'un réseau routier – Première approche : modélisation et implémentation d'outils de détection des carrefours*. Rapport de stage, Université Paris 1 Panthéon Sorbonne -- École Nationale des Sciences Géographiques.

Grünreich, D. (1985) Ein vorschlag zum Aufbau einer grossmassstabäbigen topographisch-kartographischen Datenbank unter besonderer Berücksichtigung der Grundrissdatei des ALK-Systems. In *Nachrichten aus dem Karten- une Vermessungswesen*, Series I, no. 85, pp. 53-62.

Guilmaine, D. (2011) *Contrôle et présentation interactifs des transitions fluides dans les visualisations*, Thèse de maîtrise, École de technologie supérieure, Université du Québec.

Harper, S., Michailidou, E., Stevens, R. (2009) Toward a definition of visual complexity as an implicit measure of cognitive load. *ACM Transactions on Applied Perception* (TAP), 6(2).

Harrie, L. (2001) *An optimisation approach to cartographic generalisation*. Thèse de Doctorat, Department of Technology and Society, Lund University.

Harrie, L. et Sarjakoski, T. (2002) Simultaneous graphic generalization of vector data sets. *GeoInformatica*, 6, pp. 233–261.

Harrie, L., Sarjakoski, L.T., Lehto, L. (2002) A variable-scale map for small-display cartography. In *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *34*(4), 237-242.

Harrie, L., Stigmar, H., Djordjevic, M. (2015) Analytical Estimation of Map Readability. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4, pp. 418–446.

Harrower, M., Keller, C. P., Hocking, D. (1997) Cartography on the Internet: Thoughts and a preliminary user survey. Cartographic Perspectives, (26), pp. 27-37.

Hegarty, M., Richardson, A. E., Montello, D. R., Lovelace, K., Subbiah, I. (2002) Development of a self-report measure of environmental spatial ability. *Intelligence*, 30(5), pp. 425-447.

Hegarty, M., Montello, D. R., Richardson, A. E., Ishikawa, T., Lovelace, K. (2006) Spatial abilities at different scales: Individual differences in aptitude-test performance and spatial-layout learning. *Intelligence*, 34(2), pp. 151-176.

Heer, J. et Robertson, G. (2007) Animated transitions in statistical data graphics. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 13(6), pp. 1240-1247.

Hoarau, C. (2012) Orthoimage or map visualization in use in geoportals: Case study on the French Geoportal. In *Proceedings of AutoCarto 2012.* Columbus, Ohio, USA.

Hoarau, C. (2015) *Représentations cartographiques intermédiaires: comment covisualiser une carte et une orthophotographie pour naviguer entre abstraction et réalisme?*. Thèse de doctorat, Université Paris Est, France.

Hopfstock, A. (2007) A Comparative Study of European Topographic Maps at Scale 1: 250.000. In *Proceedings of the 23rd International Cartographic Conference*.

Hornbæk, K., Bederson, B.B., Plaisant, C. (2002) Navigation patterns and usability of zoomable user interfaces with and without an overview. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction* (*TOCHI*), 9(4), pp. 362-389.

Horton, R.E. (1945) Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological society of America bulletin*, *56*(3), pp. 275-370.

IGN (2014) Scan Express : Descriptif de contenu, version 1.0. http://professionnels.ign.fr/pyramide-scan-express .

IGN (2017) Rapport d'exploitation du Géoportail - Juin 2017, consulté en ligne le 11/10/2017, https://geoservices.ign.fr/blog/2017/08/08/metriques_juin_2017.html

Ingensand, J., Nappez, M., Moullet, C., Gasser, L., Ertz, O., Composto, S. (2016) Implementation of Tiled Vector Services: A Case Study. In *SDW@ GIScience*, pp. 26-34.

Jakobsen, M.R. et Hornbaek, K. (2011) Sizing Up Visualizations: Effects of Display Size in Focus+Context, Overview+Detail, and Zooming Interfaces, In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11. ACM, Vancouver, BC, Canada, pp. 1451–1460.

Jansen, M. et van Kreveld, M. (1998) Evaluating the consistency of cartographic generalization. In *Proceedings of the 8th International Symposium on Spatial Data Handling,* pp. 668-678.

Javed, W., Ghani, S., & Elmqvist, N. (2012) Polyzoom: multiscale and multifocus exploration in 2d visual spaces. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 287-296. ACM.

Jégou, L. et Deblonde, J.-P. (2012) Vers une visualisation de la complexité de l'image cartographique. *Cybergeo : European Journal of Geography*.

Jenny, B. (2012) Adaptive composite map projections. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 18(12), pp. 2575-2582.

Jenny, B., Jenny, H., Räber, S. (2008) Map Design for the Internet. In: M.P. Peterson (editor), *International Perspectives on Maps and the Internet*, Berlin Heidelberg New York: Springer, p. 31-48.

Joao, E.M. (1995) The importance of quantifying the effects of generalization. *GIS and generalisation: methodology and practice*, pp. 183-193.

Johansson, M., Zhang, Y., Nyberg, R. (2017) Automatic map generalisation from research to production. In *Proceedings of the International Conference of Cartography*. Whashington DC, USA.

Jul, S. et Furnas G.W. (1998) Critical zones in desert fog: Aids to multi-scale navigation. In *Proceedings of the 11th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '98, pages 97–106, New York, NY, USA.

Kent, A. et Vujakovic, P. (2009) Stylistic Diversity in European State 1 : 50 000 Topographic Maps. *The Cartographic Journal*, 46(3), pp. 179-213.

Kiefer, P., Giannopoulos, I., Duchowski, A., Raubal, M. (2016) Measuring Cognitive Load for Map Tasks through Pupil Diameter. In *International Conference on Geographic Information Science*, pp. 323-337. Springer International Publishing.

Kiefer, P., Giannopoulos, I., Raubal, M., Duchowski, A. (2017) Eye tracking for spatial research: Cognition, computation, challenges. *Spatial Cognition & Computation*, 17(1-2), pp. 1-19.

Kilpeläinen, T. (2001) Maintenance of multiple representation databases for topographic data. *The Cartographic Journal*, 37(2), pp. 101-107.

Kinkeldey, C., Maceachren, A.M., Schiewe, J. (2014) How to assess visual communication of uncertainty? A systematic review of geospatial uncertainty visualisation user studies. *The Cartographic Journal*, 51(4), pp. 372–386.

Kyllonen, P. C., Lohman, D. F., & Snow, R. E. (1984) Effects of aptitudes, strategy training, and task facets on spatial task performance. *Journal of Educational Psychology*, 76(1), p. 130.

Lacoste, Y. (1980) Les Objets Géographiques. *Cartes et figures de la terre*, pp. 16-23. Centre Georges Pompidou, Paris.

Lafay, S., Braun, A., Chandler, D., Michaud, M., Ricaud, L., Mustière, S. (2015) Automatic mapping and innovative on-demand mapping services at IGN. *CaGIS - Cartography and Geographic Information Science*, 42, pp. 54–68.

Larousse (2017) Dictionnaire en ligne Larousse, http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/

Li, Z. et Huang, P. (2002) Quantitative measures for spatial information of maps. *International Journal of Geographical Information Science*, 16, pp. 699–709.

Liu, S.B. et Palen, L. (2010) The new cartographers: Crisis map mashups and the emergence of neogeographic practice. *Cartography and Geographic Information Science*, *37*(1), pp. 69-90.

Lobo, M.-J., Pietriga, E., Appert, C. (2015) An Evaluation of Interactive Map Comparison Techniques, In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15. ACM, New York, NY, USA.

Lokhat, I. et Touya, G. (2016) Enhancing building footprints with squaring operations. *Journal of Spatial Information Science*, *2016*(13), pp. 33-60.

Lokka, I. E. et Çöltekin, A. (2017) Toward optimizing the design of virtual environments for route learning: empirically assessing the effects of changing levels of realism on memory. *International Journal of Digital Earth*, pp. 1-19.

Luz, S. et Masoodian, M. (2014) Readability of a background map layer under a semi-transparent foreground layer. In *Proceedings of the 2014 International Working Conference on Advanced Visual Interfaces*, pp. 161-168. ACM.

MacEachren, A.M. (1982) Map complexity: comparison and measurement. *The American Cartographer*, 9, pp. 31–46.

MacEachren, A.M. et Kraak, M.J. (1997) Exploratory cartographic visualization: advancing the agenda. *Computers & Geosciences*, *23*(4), pp. 335-343.

Mackaness, W. et Ruas, A. (2007) Evaluation in the Map generalisation Process, In *Generalisation of Geographic Information : Cartographic Modelling and Applications*, Mackaness W., S.T., Ruas A. (Eds.). Elsevier.

Martin, D.W. (2007) *Doing psychology experiments*. Cengage Learning.

McMaster, R.B. et Shea, K.S. (1992) Generalization in digital cartography. Association of American Geographers Washington, DC.

Millet, R. et Samassa, M. (2016) Évolution du niveau d'abstraction dans les cartes multi-échelles : le thème du routier. *Rapport de projet recherche du cycle ingénieur 2ème année de l'ENSG-Géomatique*.

Miniukovich, A. et De Angeli, A. (2014) Quantification of interface visual complexity, in: *Proceedings of the 2014 International Working Conference on Advanced Visual Interfaces*. ACM, pp. 153–160.

Moacdieh, N. et Sarter, N. (2014) Display Clutter. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 51(7), pp. 61-100.

Müller, J., Lagrange, J., Weibel, R., Salgé, F. (1995) Generalization: state of the art and issues. In *GIS and Generalization Methodology and Practice*, Chapitre 1, pages 3–17. Taylor & Francis, London, 1ère édition.

Mustière, S. (2001) Appren*tissage supervisé pour la généralisation cartographique*. Thèse de doctorat, spécialité Informatique - Intelligence Artificielle. Université Paris 6, France.

Mustiere, S. et & van Smaalen, J. (2007) Database requirements for generalisation and multiple representations. In *Generalisation of geographic information: cartographic modelling and applications*. Elsevier Ltd, Amsterdam.

Mustière, S. et Devogele, T. (2008) Matching networks with different levels of detail. *GeoInformatica*, 12, pp. 435–453.

Nöllenburg, M., Merrick, D., Wolff, A., Benkert, M. (2008) Morphing polylines: A step towards continuous generalization. *Computers, Environment and Urban Systems*, *32*(4), pp. 248-260.

OGC (2006) OpenGIS® Web Map Service Implementation Specification, 06-042, version 1.3.0. Open Geospatial Consortium Inc.

OGC (2010) OpenGIS® Web Feature Service Implementation Specification, 04-094r1, version 1.1.3. Open Geospatial Consortium Inc.

OGC (2012) OGC City Geography Markup Language (CityGML) En-coding Standard, OGC 12-019, version 2.0.0. Open Geospatial Consortium Inc.

OGC (2014) OpenGIS® Web Map Tile Service Implementation Standard, 07-057r7, version 1.0.0. Open Geospatial Consortium Inc.

Olteanu-Raimond, A.-M., Mustière, S., Ruas, A. (2015) Knowledge formalization for vector data matching using Belief Theory. *Journal of Spatial Information Science* (JoSIS), pp. 21–46.

Ory, J., Christophe, S., Fabrikant, S.I. (2013) Identification of styles in topographic maps. In Proceedings of the 26th International Cartographic Conference, pp. 25-30.

Ory, J., Touya, G., Hoarau, C., Christophe, S. (2017) How to design a cartographic continuum to help users to navigate between two topographic styles?, ICC'17: Proceedings of 28th International Cartographic Conference, July 2017, Washington, DC, USA.

Parent, C. et Spaccapietra, S. (1996) Intégration de bases de données: Panorama des problèmes et des approches. *Ingénierie des Systèmes d'Information*, *4*, pp. 333-359.

Parsons E. (2014) Ambient Location: the where of everything. *ePSI Platform Workshop: Make the Most of Geo Information, INSPIRE Conference*. Aalborg University, Danemark.

Peng, D., Wolff, A., Haunert, J. H. (2016) Continuous Generalization of Administrative Boundaries Based on Compatible Triangulations. In *Geospatial Data in a Changing World*, pp. 399-415. Springer International Publishing.

Peng, D., Wolff, A., Haunert, J.H. (2017) Using the A⋆ Algorithm to Find Optimal Sequences for Area Aggregation. In *Advances in Cartography and GIScience*: Selections from the International Cartographic Conference 2017 (p. 389). Springer.

Perlin, K. et Fox, D. (1993) Pad: an alternative approach to the computer interface. In *Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. ACM. pp. 57-64.

Phillips, R.J. et Noyes, L. (1982) An Investigation of Visual Clutter in the Topographic Base of a Geological Map. *The Cartographic Journal*, pp. 122–132.

Pietriga, E. (2005) A Toolkit for Addressing HCI Issues in Visual Language Environments, IEEE Symposium on Visual Languages and Human-Centric Computing (VL/HCC'05), pp. 145-152, Dallas, TX, USA.

Pietriga, E., Appert, C., Beaudouin-Lafon, M. (2007) Pointing and beyond: an operationalization and preliminary evaluation of multi-scale searching. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1215-1224. ACM.

Pietriga, E. et Appert, C. (2008) Sigma lenses: focus-context transitions combining space, time and translucence. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1343-1352. ACM.

Pindat, C., Pietriga, E., Chapuis, O., Puech, C. (2012) JellyLens: content-aware adaptive lenses, In *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 261–270, UIST '12. ACM, Cambridge, Massachusetts, USA.

Plazanet, C. (1996) *Analyse de la géométrie des objets linéaires pour l'enrichissement des bases de données. Intégration dans le processus de généralisation cartographique des routes*. Thèse de doctorat, Université Paris Est, France.

Plumlee, M. D. et Ware, C. (2006) Zooming versus multiple window interfaces: Cognitive costs of visual comparisons. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction* (*TOCHI*), 13(2), pp. 179-209.

Pornon, H. (2007) Bilan et perspectives de 20 années de Géomatique. *Géomatique expert*, *57*, pp. 36-46.

Portet, F. (2013) Les Référentiels. Support de cours de l'École Nationale des Sciences Géographiques, http://cours-fad-public.ensg.eu/mod/imscp/view.php?id=329

Purchase, H., Freeman, E., Hamer, J. (2012) An Exploration of Visual Complexity. In *Diagrammatic Representation and Inference*, pp. 200–213, Lecture Notes in Computer Science, Cox, P., Plimmer, B., Rodgers, P. (Eds.). Springer Berlin Heidelberg.

R Development Core Team (2005) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL: http://www.R-project.org.

Racine, J.B. (1981) Problématiques et méthodologie: de l'implicite à l'explicite. *Problématiques de la géographie*, Isuard, H., Racine, J.B., Raynard, H (Eds.). Paris

Raposo, P., Brewer, C.A., Stanislawski, L.V. (2013) Label and Attribute-Based Topographic Point Thinning. In *Proceedings of 16th ICA Workshop on Generalisation and Multiple Representation*, pp. 23–24. Dresden, Germany.

Ratajski, L. (1967) Phénomènes des points de généralisation. *International Yearbook of Cartography*, 7, pp. 143–152.

Rautenbach, V., Coetzee, S., Çöltekin, A. (2017) Development and evaluation of a specialized task taxonomy for spatial planning–A map literacy experiment with topographic maps. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 127, pp. 16-26.

Regnauld, N. (1998) *Généralisation du bâti: Structure spatiale de type graphe et représentation cartographique*. Thèse de doctorat, Université de Provence, France.

Regnauld, N. (2001) Contextual building typification in automated map generalization. Algorithmica, 30(2), pp. 312-333.

Regnauld N. (2002) Généralisation de bâtiments. In *Généralisation et représentation multiples*, pp. 257-272, Ruas A. (Ed.). Hermès, Paris.

Regnauld, N. et McMaster, R. (2007) A synoptic view of generalisation operators. In *Generalisation of geographic information: Cartographic modelling and applications*, Elsevier. Amsterdam, Pays-Bas.

Regnauld, N. et Revell, P. (2007) Automatic amalgamation of buildings for producing Ordnance Survey® 1: 50 000 scale maps. *The Cartographic Journal*, *44*(3), pp. 239-250.

Regnauld, N., Touya, G., Gould, N., Foerster, T. (2014) Process Modelling, Web Services and Geoprocessing. In *Abstracting Geographic Information in a Data Rich World*, pp. 198–225, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, Burghardt, D., Duchêne, C., Mackaness, W. (Eds.). Springer, Berlin Heidelberg.

Renard, J., Gaffuri, J., Duchêne, C. (2010) Capitalisation problem in research-example of a new platform for generalisation: CartAGen. In *11th ICA Workshop on Generalisation and Multiple Representation*.

Revell P., Regnauld N., Bullbrooke G. (2011) OS VectorMap™ District: Automated generalisation, text placement and conflation in support of making public data public. In *Proceedings of the 25th International Cartographic Conference*, Ruas A. (Ed.). Paris, France.

Robertson, G., Cameron, K., Czerwinski, M., Robbins, R. (2002) Polyarchy visualization : visualizing multiple intersecting hierarchies. In *Proceedings of ACM Conference on Human Factors in Computing Systems* (CHI), pp. 423-430, ACM. Minneapolis, Minnesota, États-Unis.

Robertson, G., Fernandez, R., Fisher, D., Lee, B., Stasko, J. (2008) Effectiveness of animation in trend visualization. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* (TVCG), pp. 1325-1332.

Robinson, A.H., Morrison, J.L., Muehrcke, P.C., Kimerling, A.J., Guptill, S.C. (1995) *Elements of cartography*, John Wiley & Sons. Inc., New York, USA.

Rosenholtz, R., Li, Y., Nakano, L. (2007) Measuring visual clutter. *Journal of Vision*, 7.

Roth, R.E., Brewer, C.A., Stryker, M.S. (2011) A typology of operators for maintaining legible map designs at multiple scales. *Cartographic Perspectives*, pp. 29–64.

Roth, R., Çöltekin, A., Delazari, L., Fonseca, H., Griffin, A., Hall, A., Korpi, J., Lokka, I., Mendonça, A., Ooms, K., van Elzakker, C. (2017) User studies in cartography: opportunities for empirical research on interactive maps and visualizations, *International Journal of Cartography*, 3(2), pp. 1-29.

Ruas, A. (1999) *Modèle de généralisation de données géographiques à base de contraintes et d'autonomie*. Thèse de doctorat, spécialité Sciences de l'Information Géographique. Université de Marne-la-Vallée, France.

Ruas, A. (2004) *Le changement de niveau de détail dans la représentation de l'information géographique*. Habilitation à diriger des recherches, spécialité Sciences de l'Information Géographique. Université Paris-Est Marne-La-Vallée, France.

Ruas, A. et Plazanet, C. (1996) Strategies for automated map generalization. In *7th International Symposium on Spatial Data Handling* (SDH'96), pp. 319–336. Delft, Pays-Bas.

Ruddle, R. A., Thomas, R. G., Randell, R. S., Quirke, P., Treanor, D. (2015) Performance and interaction behaviour during visual search on large, high-resolution displays. *Information Visualization*, 14, pp. 137-147.

Saint-Marc, C., Villanova-Oliver, M., Davoine, P.A., Capoccioni, C.P., Chenier, D. (2017) User testing of dynamic geovisualizations: lessons learned and possible improvements for cartographic experiments. *International Journal of Cartography*, 3(1), pp. 88-101.

Salitchev, K.A. (1983) *Cartographic communication: A theoretical survey.* Vol. 2, chez *Graphic Communication and Design in Contemporary Cartography*, pp. 11-36. Taylor, New-York.

Samsonov, T., Podolsky, A., & Yurova, N. (2013) Multimapper—prototype system for designing multi-scale maps. In *Proceedings of the 26th International Cartographic Conference*. Dresden, Germany.

Savino, S., Massimo, R., & Matteo, Z. (2011) Pattern recognition and typification of ditches. In *Advances in Cartography and GIScience*. Volume 1, pp. 425-437. Springer Berlin Heidelberg.

Schnur, S., Bektaş, K., Çöltekin, A. (2017) Measured and perceived visual complexity: a comparative study among three online map providers, *Cartography and Geographic Information Science*, DOI: 10.1080/15230406.2017.1323676

Shupp, L., Andrews, C., Dickey-Kurdziolek, M., Yost, B., North, C. (2009) Shaping the display of the future: The effects of display size and curvature on user performance and insights. *Human–Computer Interaction*, 24(1-2), pp. 230-272.

Schwartges, N., Allerkamp, D., Haunert, J.-H., Wolff, A. (2013) Optimizing Active Ranges for Point Selection in Dynamic Maps. In *Proceedings of 16th ICA Generalisation Workshop*. Dresden, Allemagne.

Sester, M. (2005) Optimization approaches for generalization and data abstraction. *International Journal of Geographical Information Science*, 19(8-9), pp. 871-897.

Sester, M. (2007) 3D visualization and generalization. In *Photogrammetric Week*, Vol. 7, pp. 03-09.

Sester, M. et Brenner, C. (2005) Continuous Generalization for Visualization on Small Mobile Devices. In *Developments in Spatial Data Handling*, pp. 355–368. Springer Berlin Heidelberg.

Shanmugasundaram, M., Irani, P., Gutwin, C. (2007) Can smooth view transitions facilitate perceptual constancy in node-link diagrams?. In *Proceedings of Graphics Interface* (GI), pp. 71-78, ACM. Montréal, Québec, Canada.

Shannon, C.E. et Weaver, W. (1949) *The Mathematical Theory of Communication*. University of Illinois Press.

Sheeren, D. (2005) *Méthodologie d'évaluation de la cohérence inter-représentations pour l'intégration de bases de données spatiales. Une approche combinant l'utilisation de métadonnées et l'apprentissage automatique*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie-Paris 6, France.

Sheeren, D., Mustière, S., Zucker, J. D. (2004) How to integrate heterogeneous spatial databases in a consistent way?. In East European Conference on Advances in Databases and Information Systems (pp. 364-378). Springer, Berlin, Heidelberg.

Sorrows, M. E. et Hirtle, S. C. (1999) The nature of landmarks for real and electronic spaces. In *International Conference on Spatial Information Theory*, pp. 37-50. Springer, Berlin, Heidelberg.

Spiess, E. (1995) The need for generalization in a GIS environment. *GIS and Generalization: methodology and practice*, pp. 31–46.

Stanislawski, L., Buttenfield, B., Bereuter, P., Savino, S., Brewer, C. (2014) Generalisation Operators. In *Abstracting Geographic Information in a Data Rich World*, Burghardt, D., Duchêne, C., Mackaness, W. (Eds.), pp. 157–195, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Springer International Publishing.

Steiniger, S., Lange, T., Burghardt, D., Weibel, R. (2008) An approach for the classification of urban building structures based on discriminant analysis techniques. *Transactions in GIS*, 12(1), pp. 31-59.

Stigmar, H. et Harrie, L. (2011) Evaluation of Analytical Measures of Map Legibility. *The Cartographic Journal*, 48, pp. 41–53.

Stoter, J. (2005) Generalisation: the gap between research and practice. In *Proceedings of the 8th ICA Workshop on Generalisation and Multiple Representation*. La Coruña, Espagne.

Stoter, J., Burghardt, D., Duchêne, C., Baella, B., Bakker, N., Blok, C., Pla, M., Regnauld, N., Touya, G., Schmid, S. (2009) Methodology for evaluating automated map generalization in commercial software. *Computers, Environment and Urban Systems, Special Issue on Geo-information Generalisation and Multiple Representation*, 33, pp. 311–324.

Stoter, J., Post, M., van Altena, V., Nijhuis, R., Bruns, B. (2014a) Fully automated generalization of a 1:50k map from 1:10k data. *Cartography and Geographic Information Science*, 41(1).

Stoter, J., Zhang, X., Stigmar, H., Harrie, L. (2014b) Evaluation in generalisation. In *Abstracting Geographic Information in a Data Rich World*, pp. 259-297. Springer International Publishing.

Strahler, A.N. (1952) Dynamic basis of geomorphology. *Geological Society of America Bulletin*, *63*(9), pp. 923-938.

Šuba, R., Meijers, M., Huang, L., van Oosterom, P. (2014) An area merge operation for smooth zooming. In *Connecting a Digital Europe Through Location and Place*, pp. 275-293. Springer, Cham.

Šuba, R., Driel, M., Meijers, M., van Oosterom, P., Eisemann, E. (2016) Usability test plan for truly vario-scale maps. In *Proceedings of the 19th ICA Workshop on Generalisation and Multiple Representation*. Helsinki, Finland.

Sweller, J., Ayres, P., Kalyuga, S. (2011) *Cognitive load theory* (Vol. 1). Springer Science & Business Media.

Taillandier, P. (2008) *Révision automatique des connaissances guidant l'exploration informée d'arbres d'états: application au contexte de la généralisation de données géographiques*. Thèse de doctorat, Université Paris-Est, France.

Tait, M. (2005) Implementing geoportals: applications of distributed GIS. In *Computers, Environment and Urban Systems*, 29(1), pp. 33–47.

Thomson, R.C. et Brooks, R. (2000) Efficient generalisation and abstraction of network data using perceptual grouping. In *Proceedings of the 5th International Conference on GeoComputation*, pp. 23-25.

Thomson, R.C. et Richardson, D., (1999) The "Good Continuation" principle of Perceptual Organization applied to the Generalization of Road Networks. In *Proceedings of 19th International Cartographic Conference*. ICA, Ottawa, Canada.

Timpf, S. et Devogele, T. (1997) New tools for multiple representations. ICC'97, Stockholm, Editor: Lars Ottoson, pp. 1381-1386 **.**

Töpfer, F. et Pillewizer, W. (1966) The Principles of Selection. *The Cartographic Journal*, 3, pp. 10–16.

Touya, G. (2010) A road network selection process based on data enrichment and structure detection. *Transactions in GIS*, *14*(5), pp. 595-614.

Touya, G. (2011) *Le Modèle CollaGen : Collaboration de processus automatiques pour la généralisation cartographique de paysages hétérogènes*. Thèse de doctorat, spécialité Sciences de l'Information Géographique, Université Paris-Est, France.

Touya, G. (2012) Social Welfare to Assess the Global Legibility of a Generalized Map. In *Geographic Information Science 7th International Conference*, pp. 198–211, Xiao, N., Kwan, M.-P., Goodchild, M.F., Shekhar, S. (Eds.), LNCS. Springer Berlin Heidelberg.

Touya, G. et Duchêne, C. (2011) CollaGen: Collaboration between automatic cartographic generalisation processes. *Advances in Cartography and GIScience*, 1, pp. 541-558.

Touya, G. et Girres, J.-F. (2013) ScaleMaster 2.0: a ScaleMaster extension to monitor automatic multi-scales generalizations. *Cartography and Geographic Information Science*, 40, pp. 192–200.

Touya, G. et Reimer, A. (2015) Inferring the scale of OpenStreetMap features. In *OpenStreetMap in GIScience*, pp. 81-99. Springer International Publishing.

Touya, G. et Dumont, M. (2017) Progressive Block Graying and Landmarks Enhancing as Intermediate Representations between Buildings and Urban Areas. In *20th ICA Workshop on Generalisation and Multiple Representation*. Washington DC, USA.

Touya, G., Berli, J., Lokhat, I., & Regnauld, N. (2017) Experiments to Distribute and Parallelize Map Generalization Processes. *The Cartographic Journal*, 54(4), pp. 322-332.

Touya, G., Duchêne, C., Ruas, A. (2010) Collaborative Generalisation: Formalisation of Generalisation Knowledge to Orchestrate Different Cartographic Generalisation Processes. In *Proceedings of International Conference on Geographic Information Science* (GIScience'2010), Fabrikant, S.I., Reichenbacher, T., van Kreveld, M., Schlieder, C. (Eds.), LNCS 6292, pp. 264-278. Springer Berlin Heidelberg.

Touya, G., Bucher, B., Falquet, G., Jaara, K., Steiniger, S. (2014) Modelling Geographic Relationships in Automated Environments. In *Abstracting Geographic Information in a Data Rich World*, pp. 53–82, Burghardt, D., Duchêne, C., Mackaness, W. (Eds.), Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Springer, Berlin Heidelberg.

Touya, G., Decherf, B., Lalanne, M., Dumont, M. (2015) Comparing image-based methods for assessing visual clutter in generalized maps In *9th International Symposium on Spatial Data Quality* (ISSDQ'2015). Montpellier-La Grande Motte, France.

Touya, G., Christophe, S., Hoarau, C. (2016) Clutter and Map Legibility in Automated Cartography: A Research Agenda, *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 51(4), pp. 198-207

Turner, A. (2006) Introduction to neogeography. O'Reilly Media, Inc., USA.

Tversky, B., Morrison, J.B., Betrancourt, M. (2002) Animation: can it facilitate?. *International Journal of Human-Computer Studies*, 57, pp. 247–262.

van Elzakker, C.P. (2004) *The use of maps in the exploration of geographic data*. Utrecht University.

van Kreveld, M. (2001) Smooth Generalization for Continuous Zooming. In *Proceedings of 20th International Cartographic Conference*, pp. 2180–2185. ICA, Beijing, China.

van Oosterom, P., Meijers, M., Stoter, J., Šuba, R. (2014) Data Structures for Continuous Generalisation: tGAP and SSC. In *Abstracting Geographic Information in a Data Rich World*, pp. 83–117, Burghardt, D., Duchêne, C., Mackaness, W. (Eds.), Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Springer International Publishing.

van Wijk, J.J. et Nuij, W.A. (2003) Smooth and efficient zooming and panning. In *Proceedings of the IEEE Symposium on Information Visualization* (INFOVIS 2003), pp. 15–23.

Vangenot, C., Parent, C., Spaccapietra, S. (2002) Modelling and Manipulating Multiple Representations of spatial data. In *Advances in Spatial Data Handling*, pp. 81–93. Springer.

Ware, C. (2013) *Information visualization: perception for design*. Third edition. Elsevier.

Weger, G. (1999) *Cours de cartographie : sémiologie graphique et conception cartographique*. Support de cours de l'École Nationale des Sciences Géographiques.

Weibel, R. (1995) Three essential buildings blocks for automated generalization. In *GIS and Generalization: methodology and practice*, pp. 56-69, Müller, J.C., Lagrange, J.P., Weibel, R. (Eds.). Taylor & Francis.

Weibel, R. et Dutton, G. (1999) Generalising spatial data and dealing with multiple representations. *Geographical information systems*, 1, pp. 125–155.

Weng, M., Xiong, Q., Kang, M. (2017) Salience indicators for landmark extraction at large spatial scales based on spatial analysis methods. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(3), p72.

Werder, S. (2009) Formalization of Spatial Constraints. In *12th AGILE International Conference on Geographic Information Science*.

Wilson, D., Bertolotto, M., & Weakliam, J. (2010) Personalizing map content to improve task completion efficiency. *International Journal of Geographical Information Science*, 24(5), pp. 741-760.

Wong, Y. L., Zhao, J., Elmqvist, N. (2015) Evaluating social navigation visualization in online geographic maps. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 31(2), pp. 118-127.

Yan, H., Yang, W., Li, J. (2016) Approach to calculating spatial similarity degree using map scale change of road networks in multi-scale map spaces. In *AGILE Workshop on "Automated generalization for on-demand mapping" and 19th ICA Workshop on Generalisation and Multiple Representation*. Helsinki, Finlande.

Zhang, M., Shi, W., Meng, L. (2005) A generic matching algorithm for line networks of different resolutions. In *Workshop of ICA commission on generalization and multiple representation*. La Coruña, Espagne.

Zhang, X., Stoter, J., Ai, T. (2008) Formalization and Automatic Interpretation of Map Requirements. In *11th ICA Workshop on Generalisation and Multiple Representation*.

Zhang, X., Stoter, J., Ai, T., Kraak, M. J., Molenaar, M. (2013) Automated evaluation of building alignments in generalized maps. *International Journal of Geographical Information Science*, 27(8), pp. 1550-1571.

Zhou, S. (2014) Towards a Multi-Representation Database Approach to On-Demand Mapping and Continuous Zooming. In *17th ICA Workshop on Generalisation and Multiple Representation*. Vienna, Austria.

Zhou, S. et Jones, C.B. (2003) A Multi-Representation Spatial Data Model. In *Advances in Spatial and Temporal Databases, Proceedings of International Symposium on Spatial and Temporal Databases*, SSTD 2003, LNCS 2750, pp. 394-411.

Zijlstra, F.R.H. (1993) *Efficiency in work behaviour: A design approach for modern tools*. Delft, Delft University Press.

Publications Personnelles

Dumont, M., Touya, G., Duchêne, C. (2015) Adding intermediate representations in a multi-scale map to enable a smooth zooming, *Proceedings of the 3rd AGILE PhD School*, Champs-sur-Marne, France, Stefan Ivanovic, Lex Comber, Bénédicte Bucher Ed., http://ceur-ws.org/Vol-1598/paper17.pdf

Dumont, M., Touya, G., Duchêne, C. (2015) Automated Generalisation of Intermediate Levels in a Multi-Scale Pyramid, *Proceedings of 18th ICA Workshop on Generalisation and Multiple Representation*. Rio de Janeiro, Brazil.

Touya, G., Decherf, B., Lalanne, M., **Dumont, M**. (2015) Comparing image-based methods for assessing visual clutter in generalized maps In *9th International Symposium on Spatial Data Quality* (ISSDQ'2015). Montpellier-La Grande Motte, France.

Dumont, M., Touya, G., Duchêne, C. (2016a) Assessing the Variation of Visual Complexity in Multi-Scale Maps with Clutter Measures, *Proceedings of AGILE workshop on "Automated generalisation for on-demand mapping" and 19th ICA Workshop on Generalisation and Multiple Representation*. Helsinki, Finland.

Dumont, M., Touya, G., Duchêne, C. (2016b) A Comparative Study of Existing Multi-Scale Maps: What Content at Which Scale?, *Proceedings of the 9th International Conference on Geographic Information Science (GIScience 2016)*, pp. 92-95.

Dumont, M., (2017) Cartes topographiques multi-échelles : faciliter la navigation utilisateur par l'ajout de représentations intermédiaires, *26ème Journées de la Recherche de l'IGN*. Champs-sur-Marne, France.

Dumont, M., Touya, G., Duchêne, C. (2017) Alternative transitions between existing representations in multi-scale maps, *Proceedings of the 2017 International Cartographic Conference*. Washington, United-States.

Touya, G. et **Dumont, M**. (2017) Progressive Block Graying and Landmarks Enhancing as Intermediate Representations between Buildings and Urban Areas. In *20th ICA Workshop on Generalisation and Multiple Representation*. Washington DC, USA.