



Modèle pour l'évaluation et l'amélioration de la lisibilité d'une carte géographique

Firas Bessadok

► To cite this version:

Firas Bessadok. Modèle pour l'évaluation et l'amélioration de la lisibilité d'une carte géographique. Informatique [cs]. Paris-Est, 2015. Français. NNT : . tel-01233405v1

HAL Id: tel-01233405

<https://theses.hal.science/tel-01233405v1>

Submitted on 19 Apr 2016 (v1), last revised 25 Nov 2015 (v2)

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0
International License

UNIVERSITÉ — — PARIS-EST

THÈSE

Pour l'obtention du grade de
Docteur de l'Université Paris-Est
Ecole Doctorale : Mathématiques et Sciences et Technologies
de l'Information et de la Communication

Présentée et soutenue publiquement le 6 février 2015 par

Firas Bessadok

Directrice de thèse

Anne Ruas

Modèle pour l'évaluation et l'amélioration
de la lisibilité d'une carte géographique



Composition du jury

Dr Paule-Annick Davoine – LIG Grenoble INP

Rapporteur

Pr Thomas Devogele – LI Université Tours

Rapporteur

Dr Catherine Domingues – Laboratoire COGIT IGN

Encadrante

Pr Gilles Gesquieres – LIRIS Université Lyon 2

Examineur

Pr Pierre Grussenmeyer - INSA de Strasbourg

Examineur

Dr Anne Ruas – IFSTTAR Marne-La-Vallée

Directrice de Thèse

Cette thèse a été réalisée au Laboratoire COGIT de l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière, sous la direction de Anne Ruas.

*Institut National de l'Information Géographique et Forestière
Service de la Recherche, Laboratoire COGIT
73 Avenue de Paris
94165 Saint-Mandé Cedex
Tél. : 01 43 98 80 00*

RESUME

Modèle pour l'évaluation et l'amélioration de la lisibilité d'une carte géographique

Nous nous intéressons à la conception et à la visualisation de cartes personnalisées en passant par des étapes d'évaluation et d'amélioration automatiques de cette carte. Dans la plupart des outils cartographiques récents (comme le GeoPortail ou Google Maps) il est possible pour l'utilisateur de construire lui-même une carte adaptée à ses besoins à partir couches de données pouvant provenir de plusieurs sources. Cependant, la manipulation et l'édition de cartes par des non-experts peuvent engendrer des erreurs de représentation qui entravent la compréhension de cette carte par ses lecteurs.

Notre recherche concerne donc l'amélioration de la représentation de cartes créées par des utilisateurs non-experts. Nous proposons un modèle qui **évalue** la visibilité des objets cartographiques en utilisant un système de cinq indices de visibilité. Ce modèle prévoit ensuite quatre méthodes de **modification** de la symbolisation des objets cartographiques. Entre l'étape d'évaluation et celle de l'amélioration de la visibilité de ces objets, une phase d'**analyse** est effectuée dans le but de décider si une amélioration de la symbolisation est nécessaire, et si oui, lesquelles parmi ces modifications pourront être réalisées.

Ce modèle prendra comme entrée une carte géographique sous la forme (1) d'un ensemble de couches composées chacune d'objets cartographiques, (2) et de la légende utilisée pour la symbolisation de ces objets cartographiques. Il donnera en sortie (1) un ensemble de fichiers xml qui contiennent les valeurs calculés des indicateurs de visibilité, (2) une (ou des) carte(s) finale(s) avec de nouvelles symbolisations qui améliorent la valeur des indicateurs de visibilité. Ce processus offre alors aux lecteurs le choix de cartes plus lisibles.

Ce travail, implémenté en prototype basé sur la librairie open-source Geoxylene, est ensuite conclu par deux tests qui valident les hypothèses de base et les propositions avancées pour évaluer et améliorer les cartes géographiques.

Mots clés : sémiologie graphique, géovisualisation, données géographiques, légendes de cartes, visibilité d'objets cartographiques, indices de visibilité, évaluation et amélioration automatique de la visibilité, mashup cartographiques.

ABSTRACT

Model towards the evaluation and the improvement of geographical maps readability

We focus on the design and the visualization of custom geographical maps by executing different steps of automatic evaluation and improvement of these maps. In the most recent mapping tools (such as Google Maps or GeoPortail) it is possible for the user to build himself a map that suits his needs using different layers of data which can come from several sources. However, the manipulation and the edition of these kinds of maps by non-experts can cause errors in the representation that affects the understanding of the maps by their readers.

That's why our research focus on improving the representation of maps created by non-expert users. We propose a model that assesses the visibility of a map using a system of five "visibility indices". This model then provides four methods for modifying the objects symbolization. Between the evaluation and the improvement of the visibility of these objects, an analysis step is performed in order to determine whether an improvement of symbolization is necessary, and if so, which of these four methods should be executed.

This model takes as input a map in the form of (1) a set of layers each one of them consisting of cartographic objects, (2) and the legend used to represent these cartographic objects. It will generate as an output (1) a set of XML files that contain the values calculated by the indicators of visibility, (2) one or more final maps with a new representation that improves the value of these indicators of visibility. This process then provides readers with a more readable map.

This work, implemented as a prototype based on the open-source library Geoxygene, is then concluded by two tests that validate our assumptions as well as the propositions made to evaluate and improve the maps.

Keywords: graphic semiology, geovisualization, geographical data, maps key, visibility of cartographical objects, visibility indicators, automatic assessment and improvement of the visibility, mapping mashups.

REMERCIEMENTS

Comme le dit si bien Etienne Klein, directeur de recherche au CEA : « *Tout livre achevé met au repos l'esprit de son auteur* »¹, c'est donc avec joie que je voudrais m'adresser ici à ceux qui ont contribué, chacun à sa manière et à son échelle, à ce que ce travail puisse aboutir et voir le jour. Qu'ils y trouvent l'expression de ma profonde gratitude.

Je tiens d'abord à remercier ma directrice de thèse Anne Ruas pour son soutien aussi bien scientifique que moral durant ces années de recherche. Tes idées tout autant foisonnantes que créatives m'ont été une riche source d'inspiration pour faire de ce travail ce qu'il est aujourd'hui. Je tiens ensuite à remercier Catherine Domingues pour m'avoir encadré durant cette thèse. Tes conseils et ton énergie, ainsi que ton sens du détail, m'ont été indispensables pour atteindre mon objectif. Anne et Catherine, je vous remercie pour la confiance que vous m'avez donnée.

Je voudrais ensuite remercier l'IGN et le laboratoire COGIT pour m'avoir ouvert les portes afin de réaliser ma thèse dans leurs équipes. En particulier Sébastien Mustière pour m'avoir guidé les premières semaines et pour l'environnement chaleureux qu'il anime au sein du laboratoire.

Mes remerciements s'adressent par la suite aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer mon travail et m'avoir fournis leurs avis, interrogations, et conseils très pertinents : Paule-Annick Davoine, Thomas Devogele, Gilles Gesquière, et Pierre Grussenmeyer.

Un grand merci également à tous les chercheurs de l'IGN et du laboratoire COGIT en particulier. Mes collègues de bureau, Cécile et Laurence. Eric G. pour les longues discussions techniques, technologiques, et parfois philosophiques. Carmen pour avoir partagé dès nos débuts, à une semaine d'intervalle, la progression parallèle de nos recherches respectives. Eric M. pour ta bonne humeur constante. Ammar pour toutes nos discussions passionnantes et interminables. Kusay pour m'avoir initié au ping-pong et au développement sous Android. Gokhan pour les soirées wok/guitare et pour les éclats de rires sur des commentaires dans quelques codes sources (*la variable cpt est un compteur pour parcourir le tableau T*). Ainsi que Melih et Fayçal pour les sorties et les petites excursions dans le bois de Vincennes. Bien entendu tous les chercheurs du COGIT également, Bénédicte, Charlotte, Jean-François, Jeremy, Julien, Elodie, Nathalie, Guillaume, Sidonie, Mickael, Jérémie, Bertrand, Marie-Dominique, et Benoit, merci pour vos encouragements, aides, et remarques pertinentes lors des réunions du laboratoire. Et bien sûr, mes amis de l'autre côté du TGV, Aymen pour avoir apporté des idées avec un œil externe à mon travail, et Bilel pour m'avoir aidé à réaliser une partie des tests de validation.

¹ « En cherchant Majorana : le physicien absolu », Paris, Flammarion/Équateurs essais, 2013.

Je tiens aussi à remercier le personnel administratif et logistique très efficace et pas moins amical de l'IGN : Marie-Claude Foubert, François Boyero, et Mounia Ahmedi.

De même qu'à Sylvie Cach de l'école doctorale MSTIC de Paris-Est, un grand merci pour ta disponibilité et ton aide précieuse en cours et en fin de thèse.

Une pensée spéciale à Khaled et Fayçal qui ont toujours été là pour moi dès mes premiers pas à l'université de Paris VI. Merci tonton Khaled d'être venu à la soutenance.

Et bien entendu un très grand merci à ma famille sans qui rien de ce que j'ai fait n'aurait vu le jour. Merci infiniment pour votre soutien et vos encouragements. Un très grand merci à ma mère qui m'a tout appris. À mon père qui m'a tout enseigné et qui m'a transmis son amour des sciences, des maths, et de la technologie. Et à mes deux sœurs pour leur soutien inconditionnel et leur joie de vivre habituelle.

Et finalement merci à Akira Toriyama pour avoir dessiné *Dragon Ball*, à Dennis Ritchie pour avoir inventé le langage C, ainsi qu'à Michael Crichton pour avoir écrit *Jurassic Park*.

À mes parents

TABLE DES MATIERES

Introduction générale.....	17
Partie A - Etude de l'existant	21
1. La cartographie.....	21
1.1. De la Terre à la carte papier	23
1.2. De la carte papier à la carte sur écran.....	47
2. Systèmes de construction de cartes personnalisées.....	50
2.1. Géoportails	50
2.2. Mashup cartographiques	53
2.3. Les cartes produites grâce à des applications de type « SoLoMo ».....	55
2.4. Adapter la cartographie aux nouveaux supports	56
3. Efficacité des cartes : bien percevoir, bien reconnaître, bien organiser.....	58
4. Travaux de recherche sur l'aide à l'amélioration de cartes.....	67
5. Positionnement.....	74
5.1. Limites et problématiques	74
5.2. Proposition	79
Partie B - Proposition	81
1. Approche et présentation du modèle.....	81
2. Proposition d'un système d'indices pour mesurer la visibilité des objets cartographiques	82
2.1. Création d'enveloppes et de buffers.....	86
2.2. Calcul de surface	89
2.3. Indice de superposition.....	94
2.4. Indice de taille	98
2.5. Indice de quantité de couleurs désagréables	100

2.6.	Indice de contraste de couleurs	103
2.7.	Indice d'épaisseur de bordure	107
2.8.	Conclusion.....	109
3.	Proposition d'amélioration de la visibilité, et son impact sur les indices de visibilité	
3.1.	Réordonner l'ordre d'affichage des couches de données.....	110
3.2.	Modifier la taille des bordures	115
3.3.	Modifier des couleurs.....	118
3.4.	Optimiser la représentation des petits objets.....	122
3.5.	Proposition d'un algorithme de génération de cartes améliorées.....	124
3.6.	Algorithme de génération de cartes pour les tests.....	126
3.7.	Conclusion.....	130
4.	Mise en œuvre du modèle : Le prototype.....	132
4.1.	Outils externes.....	132
4.2.	L'outil IndiceApplication	133
4.3.	Modélisation.....	136
4.4.	Jeux de données.....	141
4.5.	Exemple de scénario d'utilisation	141
5.	Tests de validation.....	142
5.1.	Test de déficiences visuelles	142
5.2.	Test de validation des indices de visibilité.....	143
5.3.	Test de validation des algorithmes d'amélioration	165
5.4.	Conclusion sur les tests	173
	Conclusion.....	175
1.	Etude.....	175
2.	Apport.....	176

3. Validation	177
4. Perspectives	177
4.1. Au niveau des indices	177
4.2. Au niveau des méthodes d'améliorations	178
4.3. Au niveau de la convergence de l'algorithme final	178
Annexe	180
Bibliographie	181
Publications	186
Table des figures	187
Table des algorithmes	191
Tableaux	193

INTRODUCTION GENERALE

L'avènement du réseau internet en général et du web en particulier dans les années 90 a facilité le partage et l'accès aux connaissances. Il est devenu relativement facile pour quiconque équipé du matériel adéquat d'accéder à des sources d'informations fiables et abondantes.

Depuis les années 2000, une nouvelle facette du web a pris forme. Dénommée Web 2.0, cette nouvelle facette offre aux internautes la possibilité de créer du contenu sur un ou plusieurs sites web. Ce contenu, généralement des « commentaires » sur des pages web, peut avoir plusieurs formes.

Suite à cette nouvelle possibilité, de nombreuses plateformes de création de contenu ont émergé. Certaines privilégient l'apport individuel (blogs, micro-blogging, etc), tandis que d'autres sont orientées vers la collaboration (la famille des Wikimedia par exemple).

Parmi ces plateformes de création de contenu, certaines offrent la possibilité de manipuler et de créer des cartes géographiques, c'est notamment le cas de OpenStreetMap ou de Google Maps par exemple. Ce genre d'outils en ligne, ainsi que d'autres outils hors-ligne, permet à ses utilisateurs d'éditer des données géographiques (légendes, symboles vectoriels, etc) et de les superposer à plusieurs supports cartographiques comme des photographies satellite, des cartes simples, des cartes 3D, des scans de cartes anciennes, et même des cartes personnalisées fournies par l'utilisateur lui-même.

Cette disponibilité de données et d'outils (SIG, serveur web) fait qu'il est désormais possible de réaliser des cartes numériques alors que cette activité était autrefois essentiellement réalisée par des spécialistes. Les avantages à cela sont plusieurs, ainsi, un utilisateur ou un groupe d'utilisateurs peut par exemple dessiner et imprimer l'itinéraire qu'il empruntera pour sa prochaine promenade en vélo, ou encore l'itinéraire de la prochaine randonnée en évitant les pentes raides. Un autre utilisateur peut créer, grâce aux données géographiques disponibles, des outils de localisation pratiques comme par exemple un site web ou une application mobile de recherche de stations vélib' libres.

D'un autre côté, cette possibilité aux utilisateurs non-initiés de créer des cartes géographiques présente également des inconvénients. En effet, il devient plus simple de trouver des cartes qui ne respectent pas des règles de symbolisation basiques par exemple. Il devient plus simple de trouver des cartes dont les données représentées ne sont pas mises à la bonne échelle. Il devient plus simple de trouver des cartes qui ne permettent pas une différenciation visuelle facile entre les symboles utilisés, que ce soit par manque de contraste de couleur ou par cause de mauvaise généralisation.

L'objectif de cette thèse est donc de concevoir un modèle informatique qui puisse évaluer la visibilité des symboles graphiques utilisés dans une carte géographique donnée, et qui puisse, à l'issue de cette évaluation, proposer des modifications de symbolisation qui permettront

d'améliorer automatiquement la visibilité de ces symboles graphiques. En effet, la lisibilité et la compréhension d'une carte sont directement liées à la visibilité des symboles représentés sur cette carte.

Cette thèse est réalisée au laboratoire COGIT de l'IGN. Elle se base en partie sur les recherches déjà effectuées dans ce laboratoire, notamment celles sur l'amélioration de la construction de légendes à partir de ces données numériques. On peut noter la thèse d'Elisabeth Chesneau sur l'amélioration des contrastes par analyse des couleurs sur la carte (Chesneau 2006), les travaux d'Elodie Buard sur l'amélioration des contrastes perçus (Buard et Ruas 2009 et 2011) la thèse de Sidonie Christophe sur le choix de palettes de couleurs (Christophe 2009), les travaux de Catherine Dominguès sur la caractérisation de légendes (Dominguès 2012), et la thèse de Francis Dhée sur l'amélioration des légendes pour prendre en compte les difficultés d'appréhension des couleurs par les différents types de daltoniens (Dhée 2013).

Dans notre thèse, nous proposons d'analyser la symbolisation des objets cartographiques pour quantifier leur visibilité. Suite à quoi nous proposons des modifications de cette symbolisation en vue d'améliorer leur visibilité. L'analyse est réalisée à l'aide d'indicateurs de visibilité. Puis, les améliorations sont réalisées sur l'ordre des couches, mais aussi la forme, la couleur, la taille, et la bordure des symboles.

Ce rapport est composé de deux parties principales. La partie A présente les éléments et concepts manipulés durant cette thèse ainsi qu'une partie des travaux dont nous nous sommes inspiré. La partie B explique en détail nos propositions et fait une synthèse des tests réalisés durant cette thèse ainsi que les résultats obtenus à partir de ces tests. Chacune de ces parties est divisée en chapitres.

Le chapitre A.1 présente et explique quelques éléments de cartographie dont les différentes projections, la légende, le concept de variables visuelles, la technique de généralisation, et la géovisualisation. Des généralités sur la couleur sont également expliquées ainsi qu'un historique des recherches sur l'organisation de couleurs en cercle chromatique.

Le chapitre A.2 aborde le nouveau contexte des systèmes de création de cartes personnalisées. Le concept de Géoportail y est expliqué, ainsi que ses deux principaux types. Suite à cela, les Mashup Cartographiques, qui sont un type particulier d'outils sur le web et qui permettent d'agréger plusieurs données cartographiques sont introduits. Le concept de SOLOMO est ensuite abordé. Il présente certaines applications mobiles modernes qui reposent sur la manipulation de données géographiques. Suite à cela, une discussion est proposée sur les méthodes d'adaptation des outils cartographiques aux nouveaux supports d'affichage que sont les écrans numériques, en particulier les écrans des appareils mobiles.

Le chapitre A.3 présente des éléments qui permettent de définir l'efficacité des cartes selon des recherches déjà réalisées. Dans ce chapitre, la relation entre la lisibilité d'une carte et la visibilité des objets représentés sur cette carte est expliquée.

Le chapitre A.4 revient sur un ensemble de travaux de recherche qui étudient l'aide à l'amélioration des cartes. Quelques travaux du laboratoire COGIT et d'autres laboratoires internationaux y sont introduits. Ces travaux sont principalement focalisés sur la couleur mais prennent des approches différentes. Par exemple, certains travaux proposent de corriger le contraste de couleur en étudiant les objets voisins sur la carte, tandis que d'autres préfèrent régler ce problème de contraste de couleur entre les lignes de la légende.

Finalement, le chapitre A.5 explique notre positionnement dans cette thèse en listant d'abord les problématiques soulevées, pour ensuite introduire la proposition faite en vue de corriger ces problématiques.

Dans le chapitre B.1, nous introduisons l'approche retenue et nous présentons de manière synthétique le modèle conçu.

Le chapitre B.2 explique plus en détail le modèle qui permet d'évaluer la visibilité des objets cartographiques. Le système d'indicateurs de visibilité, ou d'indices de visibilité, y est introduit. Pour cela, les techniques de calcul de surface et de création d'enveloppes, qui sont des techniques utilisées par ces indices, sont également expliquées.

Suite à l'évaluation de la visibilité, le chapitre B.3 introduit les méthodes de modification de la symbolisation afin d'améliorer cette visibilité. Pour chacun des indices de visibilité et des modifications de symbolisations, les chapitres B.2 et B.3 présentent les algorithmes associés sous forme de pseudo-code.

Le chapitre B.4 présente quant à lui le prototype réalisé qui consiste en l'implémentation de la plupart des algorithmes introduits dans les chapitre B.2 et B.3. Pour cela, il présente également les outils externes réutilisés, ainsi que la modélisation de ce prototype selon la méthode UML.

Finalement, le chapitre B.5 présente les tests de validation réalisés en fin de thèse et qui étudient la pertinence des indices de visibilité et des méthodes de modification de la symbolisation.

PARTIE A - ETUDE DE L'EXISTANT

1. LA CARTOGRAPHIE

Afin de pouvoir évaluer et améliorer la représentation graphique de la carte, il faut d'abord comprendre le concept de la cartographie ainsi que les techniques utilisées pour la construction des cartes géographiques.

Le mot « Cartographie », provenant du grec (Χάρτης) est composé des deux termes *khartes* : papier, parchemin ; et *grapho* : écrire, dessiner. La cartographie peut ainsi être définie comme l'étude des cartes géographiques qui met en œuvre un ensemble de techniques permettant la réalisation et l'édition de ces cartes.

La définition du terme « *carte* » a, quant à elle, subi plusieurs évolutions depuis le XVII^e siècle lorsque le mot *carte* fut adopté en géographie. Ainsi, des définitions simples et basiques peuvent être trouvées dans les sources non spécialisées, comme :

- « Une *carte* est une image réduite et codée d'une partie d'un territoire »²
- Une *carte* est une « représentation d'un espace géographique. Elle met en valeur l'étendue de cet espace, sa localisation relative par rapport aux espaces voisins, ainsi que la localisation des éléments qu'il contient »³

Gilles Palsky (2005) explique que la multitude de définitions pour cet unique terme est due à la pluralité de l'utilisation de la carte géographique et donc à la pluralité des types de cartes. Inclure la totalité de ces types devient une problématique à part entière sur laquelle travaillent des commissions comme « The Working Group on Cartographic Definitions ». Cette commission propose ainsi la définition suivante (Board, 1991) :

« La *carte* est une image conventionnelle représentant une sélection d'objets ou de caractéristiques d'une réalité géographique, conçue pour être utilisée lorsque les relations spatiales ont une pertinence fondamentale ».

En version originale : « A conventionalized image representing selected features or characteristics of geographical reality designed for use when spatial relationships are of primary relevance ».

Ou encore le « Comité Français de Cartographie » (CFC, 1990), qui décrit la *carte* de la façon suivante :

« Représentation géométrique conventionnelle, généralement plane, en positions relatives, de phénomènes concrets ou abstraits, localisable dans l'espace ; c'est aussi un document portant

² <http://www.latoilescoute.net/La-carte-IGN>

³ http://fr.wikipedia.org/wiki/Carte_géographique

cette représentation ou une partie de cette représentation sous forme d'une figure manuscrite, imprimée ou réalisée par tout autre moyen ».

Une *carte* est donc une représentation obtenue grâce à un ensemble d'opérations qui aboutissent à la réalisation d'un objet visible, un dessin plan ou en trois dimensions (globe, maquettes), réel (palpable) ou virtuel (électronique).

Ainsi lorsque les définitions disent que « la *carte* est une image » et que la *carte* est « un document (..) sous forme d'une figure » cela indique que la *carte* est le dessin d'un terrain géographique, et n'est pas le terrain géographique lui-même. Ainsi la *carte* peut être considérée comme une simplification de la réalité, n'ayant pas comme objectif le parfait réalisme, mais la caricature commode destinée à faciliter la projection de soi dans l'environnement, à reconnaître la localisation du terrain et les éléments représentés, pour réaliser une tâche précise, comme par exemple trouver un itinéraire sur une carte routière ou reconnaître la nature du sol sur une carte géologique. Ces mots utilisés dans les deux définitions excluent toute représentation non graphique comme les bases de données géographiques qui sont, certes, une représentation de données spatiales mais pas sous forme visuelle.

De même, les définitions précisent que la *carte* est « une image conventionnelle (...) conçue » sous forme « manuscrite, imprimée ou réalisée par tout autre moyen ». La *carte* étant le produit d'une fabrication humaine, une photo satellite n'est donc pas considérée comme une carte mais comme une photographie. On utilise d'ailleurs le terme spatiocarte pour qualifier une carte qui a un fond d'image sur lequel sont ajoutés des symboles et des toponymes.

Les définitions expliquent d'un autre côté que la *carte* représente une « réalité géographique » ou des « phénomènes concrets ou abstraits localisables dans l'espace », cela peut donc inclure les terrains non terrestres (une portion de ciel étoilé, un terrain d'une autre planète, etc) réels, mais également les terrains non réels comme un monde imaginaire ou mythologique. Le contenu d'une carte n'est donc pas limité à la seule surface terrestre réelle.

Du fait de la multitude d'objectifs et d'utilisations des cartes géographiques, celles-ci ont été déclinées en différents types, toutes ayant une structure conventionnelle qui comporte généralement quatre éléments représentés sur le plan : le titre de la carte, l'emprise géographique représentée (la carte en elle-même), la légende utilisée et l'échelle de la carte (Figure 1).

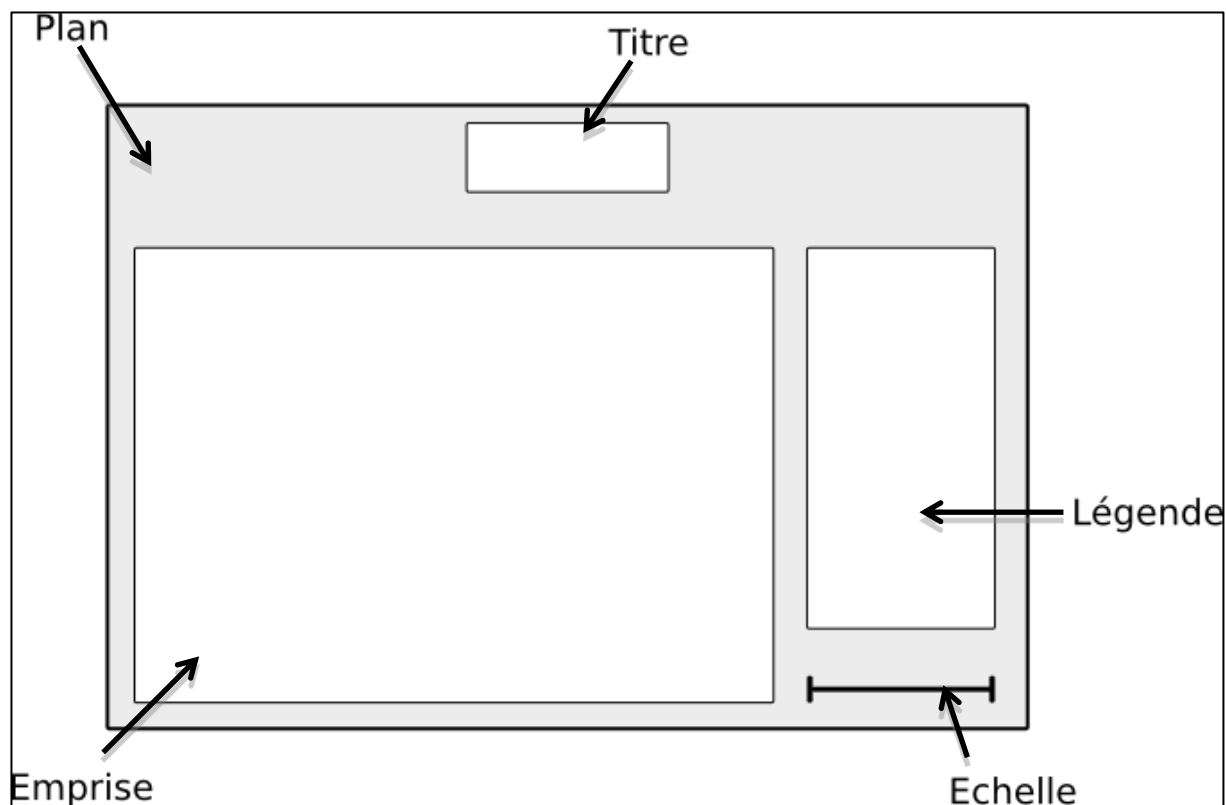


FIGURE 1 STRUCTURE CONVENTIONNELLE D'UNE CARTE GEOGRAPHIQUE

Plusieurs types de cartes géographiques existent, on peut notamment citer : les cartes topographiques, les cartes géologiques, les cartes routières, ainsi que d'autres types de cartes. Chacun de ces types de cartes a des propriétés, des particularités et des objectifs propres.

Plusieurs domaines scientifiques et processus participent à la conception cartographique. On peut citer notamment : les systèmes de projections, la conception de légendes et la sémiologie graphique, la généralisation et la géovisualisation. Nous introduisons ceux qui nous paraissent pertinents pour notre objet de recherche.

1.1. DE LA TERRE A LA CARTE PAPIER

La Terre a une forme d'ellipsoïde irrégulière (le géoïde) due à sa rotation et à la répartition des masses de différentes natures. On approxime le géoïde en général par un ellipsoïde puis on projette la surface de l'ellipsoïde sur différents plans. Dans la suite nous appellerons *globe* la représentation volumique de la Terre. L'une des problématiques de la cartographie est de répondre à la question « Comment représenter la surface tridimensionnelle sur une surface plane en deux dimensions tout en minimisant les altérations ? ». La projection est le processus qui tente de résoudre cette problématique.

Coordonnées géographiques

Dans le but de permettre et de faciliter le repérage d'un point sur le globe terrestre, un système de repérage conventionnel a été adopté. Le globe fut divisé par une grille de lignes perpendiculaires imaginaires : les méridiens et les parallèles (Figure 2).

Les méridiens sont des lignes circulaires dont les extrémités relient les deux pôles.

Les parallèles sont des lignes circulaires entourant le globe et qui sont perpendiculaires aux méridiens.

Le parallèle d'origine est l'équateur, éloigné des pôles d'environ 10000 km ; il sépare l'hémisphère nord de l'hémisphère sud de la Terre. L'axe de rotation de la Terre est perpendiculaire au plan coupant la Terre au niveau de l'équateur.

Le méridien d'origine est choisi de manière arbitraire, vu qu'il n'existe pas de critère naturel pour son choix comme l'est l'axe de rotation de la Terre pour les parallèles. Le méridien de Greenwich en Angleterre fut adopté comme méridien d'origine en octobre 1884⁴.

Grâce aux parallèles et aux méridiens, il devient possible de repérer n'importe quel point sur la surface de la Terre. Un point possède donc des coordonnées géographiques consistant en un couple de valeurs (latitude, longitude). A un point est associé un couple unique de coordonnées géographiques, et un couple de coordonnées géographiques identifie un seul point.

La latitude d'un point est la distance angulaire (exprimée en degrés) entre ce point et l'équateur. Ainsi la latitude de l'équateur est de 0° , et celle des pôles est de 90° (on les distingue sous les appellations latitude Nord et latitude Sud). Une ligne parallèle est donc formée de tous les points sur le globe terrestre ayant la même latitude.

La longitude d'un point est la distance angulaire (exprimée en degrés) entre le point et le méridien d'origine. La longitude s'étend donc de 0 à 180° , on distingue également longitude Est et longitude Ouest. Un méridien est donc formé de tous les points sur le globe terrestre ayant la même longitude.

⁴ Le méridien de Greenwich a été adopté comme standard international à la conférence « International Conference held at Washington for the purpose of fixing a Prime Meridian and Universal Day » qui a eu lieu en plusieurs sessions en 1884 à Washington, Etats-Unis d'Amérique.

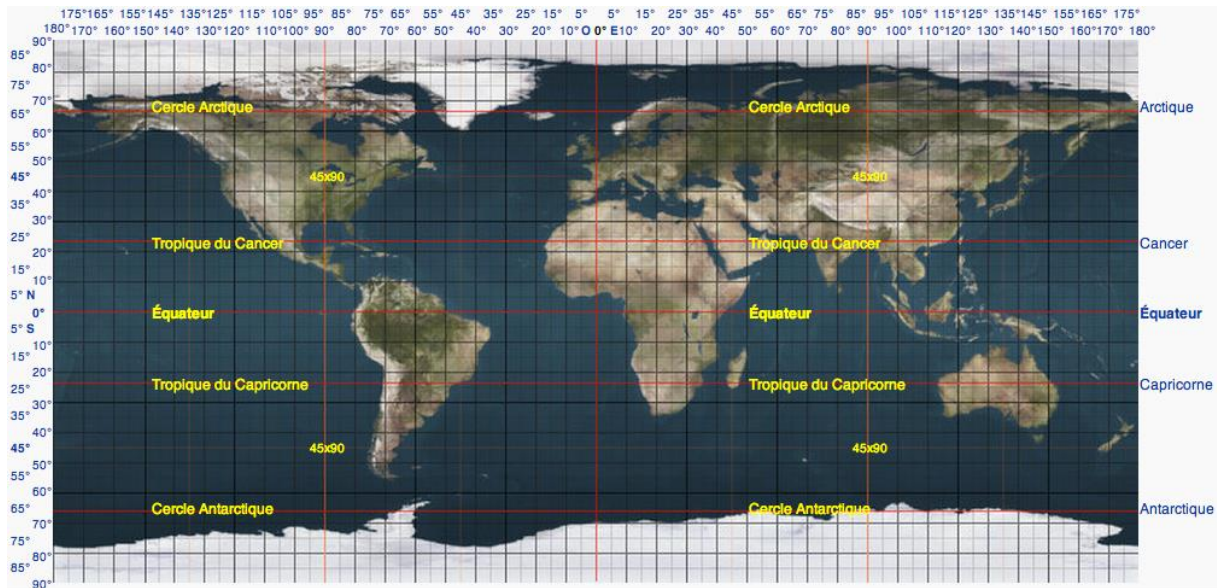


FIGURE 2 SCHEMA ILLUSTRANT LE DECOUPAGE D'UNE CARTE PAR DES MERIDIENS ET DES PARALLELES (WIKIPEDIA)

En utilisant ce système de coordonnées géographiques on peut donc attribuer à n'importe quel point, un couple (latitude, longitude) qui identifie sa position. Par exemple, les coordonnées de Paris sont les suivantes :

- Latitude : 48.856578°
- Longitude : 2.351828°

Les projections

La projection cartographique est l'ensemble de techniques qui permet grâce à des formules mathématiques de faire correspondre à chaque point d'un globe un unique point sur une surface plane, et inversement.

La projection a donc pour objectif de représenter le globe, qui ne peut être étalé, sur une surface pouvant l'être.

Ces projections engendrent des altérations sur des propriétés spatiales, comme les longueurs et les angles, provoquant des déformations au niveau des angles et des surfaces. Ainsi sur certaines projections, le Groenland peut paraître aussi vaste que le continent Africain alors qu'en réalité il est 15 fois plus petit.

Il existe principalement trois types de projections qui peuvent être classées selon les déformations qu'elles engendrent :

- Projection conforme : conserve les angles (et les formes)
- Projection équivalente : conserve les surfaces

- **Projection aphylactique** : ce sont les projections qui tentent de minimiser les déformations des deux autres projections. Un cas particulier des projections aphylactiques concerne les projections dites équidistantes, du fait qu'elles conservent les distances des méridiens entre eux et des parallèles entre eux.

Les projections conformes et équivalentes étant exclusives, il n'est pas possible qu'une projection soit à la fois conforme et équivalente.

Pour passer d'un globe ne pouvant être étalé à une surface plane pouvant l'être, plusieurs modèles mathématiques sont utilisables, nous présentons les trois principaux :

Projection azimutale : le globe est projeté sur une surface plane qui coupe ce globe en un point ou en plusieurs (formant une ellipse). Exemples : projection stéréographique (Figure 3), projection azimutale équivalente de Lambert (Figure 4).

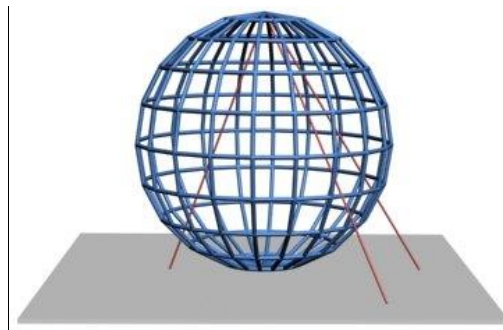


FIGURE 3 SCHEMA ILLUSTRANT LA PROJECTION AZIMUTALE STEREOGRAPHIQUE ⁵



FIGURE 4 PROJECTION AZIMUTALE EQUIVALENTE DE LAMBERT, EQUATORIALE SUR LE MERIDIEN CENTRAL ⁶

⁵ Infographie par Traroth sous GFDL. 26/03/2005

⁶ Carlos Alberto Furuti <http://www.progonos.com/furuti/>

Projection conique : le globe est projeté sur un cône qui coupe ce globe en une ou deux ellipses (Figure 5). Le cône est ensuite étalé pour obtenir la carte. La projection conique conforme de Lambert (Figure 6) est l'une des projections coniques les plus connues.

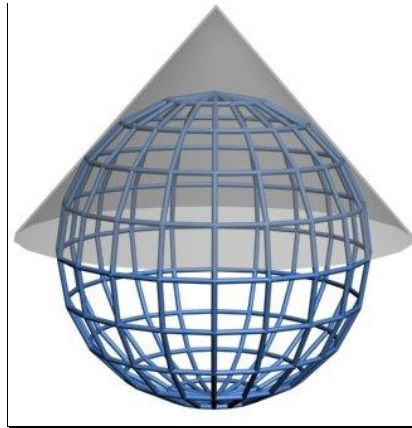


FIGURE 5 SCHEMA ILLUSTRANT LA PROJECTION CONIQUE ⁷

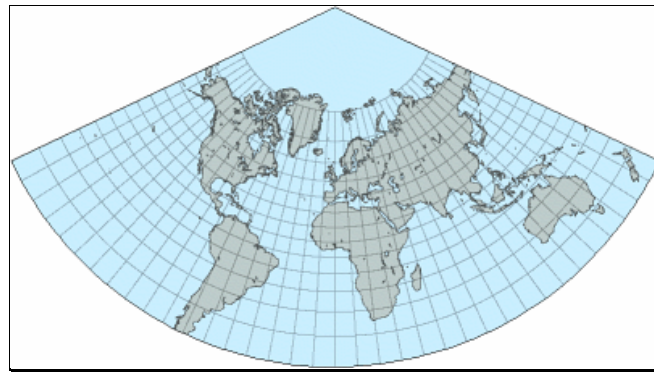


FIGURE 6 PROJECTION CONIQUE CONFORME DE LAMBERT ⁸

Projection cylindrique (Figure 7): le globe est projeté sur un cylindre qui le coupe en une ou deux ellipses. Le cylindre est ensuite étalé pour obtenir la carte. Les projections de Mercator (Figure 8) et UTM figurent parmi les projections cylindriques les plus connues.

⁷ Infographie par Traroth sous GFDL. 22/03/2005

⁸ Carlos Alberto Furuti <http://www.progonos.com/furuti/>

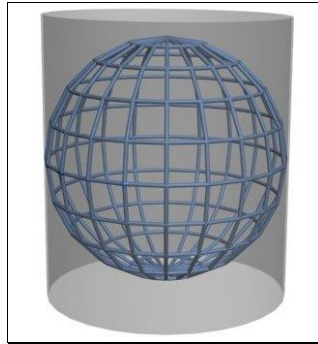


FIGURE 7 SCHEMA ILLUSTRANT LA PROJECTION CYLINDRIQUE ⁹

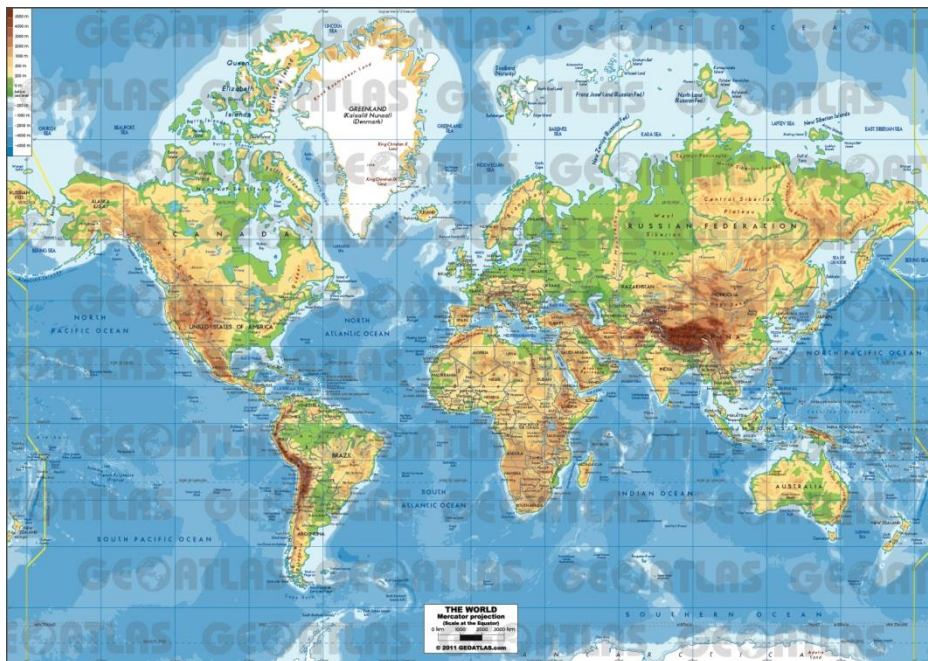


FIGURE 8 PROJECTION DE MERCATOR ¹⁰

L'échelle

La carte géographique permet le repérage spatial grâce à une simplification de l'environnement réel. Il serait en effet incongru de représenter une zone géographique avec les mêmes dimensions que celles initiales, une des techniques de simplification est la mise à l'échelle.

La mise à l'échelle est la technique qui permet de réduire les dimensions réelles du terrain représenté sur la carte. Elle est exprimée par une fraction 1/N de la sorte:

$$Echelle = \frac{\text{distance sur la carte}}{\text{distance réelle}}$$

⁹ Infographie par Traroth sous GFDL. 22/03/2005

¹⁰ Geo Atlas <http://www.geoatlas.com/en/maps/world-maps-0/mercator-projection-24>

Ainsi, une carte ayant une échelle 1/100 (ou 1:100) signifie que les dimensions réelles sont 100 fois plus grandes que les dimensions mesurées sur cette carte. Dans ce cas, 1 centimètre sur la carte représente 1 mètre dans la réalité. Quelques exemples sont listés dans le Tableau 1.

Une échelle qui se rapproche de 1/1 est désignée par « grande échelle » et est utilisée par des représentations proches de la réalité, donc plus précises.

A l'inverse, une « petite échelle » est utilisée pour les grandes étendues et implique une simplification de la représentation des objets, voire la suppression de plusieurs détails qui ne sont pas pertinents par rapport à l'objectif de la carte.

Echelle	1cm sur la carte représente
1 /25 000	250 m
1/50 000	500 m
1/100 000	1 km
1/250 000	2.5 km
1/1 000 000	10 km

TABEAU 1 QUELQUES ECHELLES UTILISEES PAR L'IGN ET LES DIMENSIONS REELLES QU'ELLES REPRESENTENT

Légende et sémiologie graphique

Suite au processus de projection, et après saisie des coordonnées selon divers procédés, nous avons maintenant un ensemble de points sur une surface plane censé être la représentation du globe terrestre. Cependant, cet ensemble de points est difficilement lisible et peu exploitable, à cause de l'absence de sens rattaché à ces points. Des symboles sont donc utilisés pour faire comprendre le sens des objets dessinés. C'est à ce niveau que se positionne l'objectif de la sémiologie graphique : rajouter du sens à des signes cartographiques afin que ces derniers soient compris le mieux possible par leurs lecteurs.

Le lecteur d'une carte géographique s'aide de la carte pour mieux appréhender certains concepts. Ainsi, un lecteur d'une carte peut l'utiliser pour retrouver son chemin dans un bois, un autre lecteur pour mieux comprendre la démographie européenne, un troisième s'intéresse à la qualité de l'air dans la périphérie urbaine d'une ville en particulier.

Les concepts abordés par les cartes et l'utilité de ces cartes sont nombreux et variés, mais tous ont un point commun : la transmission de l'information (ou « sens ») à travers des représentations graphiques (ou « signes »). Cette transmission de l'information se fait par l'intermédiaire de la légende.

La légende est définie comme le « *Tableau descriptif, non nécessairement complet, des conventions cartographiques permettant la lecture de la carte* »¹¹. La légende met donc en correspondance un signe représenté sur la carte et sa sémantique, ou sens, son rôle étant d'expliquer la signification de tous les signes que cette carte utilise.

Une bonne légende rend la carte compréhensible pour le lecteur car les correspondances signes-sens sont correctes, de même que les relations entre les signes de cette légende mettent en évidence des relations entre les sens de ces signes. Ainsi, un choix pertinent de légende aboutit à la construction d'une carte efficace.

Pour réaliser une légende correcte et pertinente, et par conséquent pour pouvoir lire efficacement les cartes en s'appuyant sur ces légendes, il faut auparavant préciser un ensemble de notions introduites par la sémiologie graphique.

La sémiologie est définie par Saussure (1916) comme étant « *une science qui étudie la vie des signes au sein de la vie sociale* ». Ainsi, toute science étudiant les signes est appelée sémiologie. Dans notre contexte nous nous intéressons à la sémiologie graphique.

La sémiologie graphique est une branche de la sémiologie. Elle offre un cadre théorique pour l'étude des signes graphiques, incluant donc les signes cartographiques, afin de permettre une meilleure compréhension des cartes. Elle est définie dans le glossaire de la cartographie comme étant « *l'étude des signes graphiques, de leur propriétés et de leurs rapports avec les éléments de l'information qu'ils expriment* »¹²

Un **signe** cartographique (ou symbole) est défini dans le glossaire de cartographie comme la « *figuration graphique, colorée et/ou alphanumérique, affectée à un phénomène pour le représenter sur la carte* »¹³.

Ces signes peuvent avoir trois types d'implantations (ponctuelle, linéaire, surfacique) qui dépendent de la géométrie de l'information représentée. Ils expriment entre eux trois types de relations qui dépendent du classement sémantique en thèmes, voulu par l'auteur de la carte. Les trois types de relations possibles entre les signes graphiques sont les relations de **différenciation** entre des éléments de natures différentes, d'**ordre** entre des éléments de même nature mais hiérarchisés, et d'**association** entre des éléments de natures différentes mais apparentés. On parle de symbolisation ponctuelle, linéaire ou surfacique lorsque le signe est associé respectivement à un point, une ligne ou une surface.

Symbolisation ponctuelle : Le signe est représenté sur le point associé, il est généralement compact et de petite taille. Il peut avoir une forme particulière différente du cercle ou du disque mais il ne possède généralement pas de relation graphique avec les autres signes de la carte. Ex : mairies, tours, bâtiment de culte, terrain de sport. Généralement chaque symbole

¹¹ Glossaire de cartographie, 1990, p 67

¹² Glossaire de cartographie, 1990, p 59

¹³ Glossaire de cartographie, 1990, p 58

- Un poncif est un symbole ponctuel répété de façon plus ou moins régulière dans la surface (voir la symbolisation de la végétation dans la figure suivante)
- Une trame est un ensemble de points ou de lignes organisés de façon régulière, et qui couvre la surface.
- Un poncif est potentiellement plus informatif qu'une trame puisque la forme du symbole peut donner une information sur la nature du thème (par exemple la représentation des conifères dans la figure suivante).

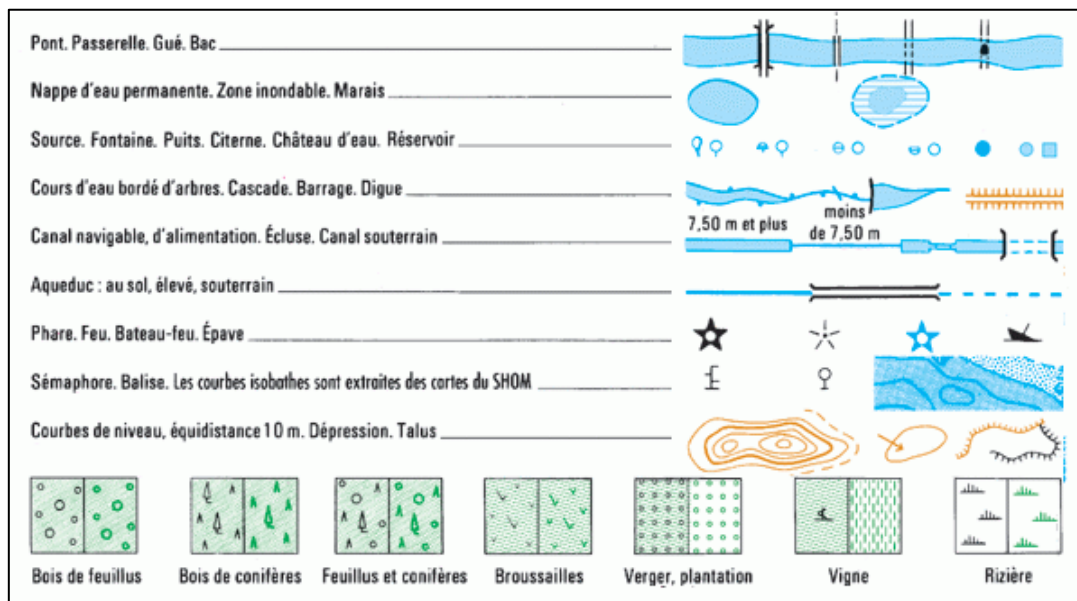


FIGURE 11 DES SYMBOLES SURFACIQUES DANS LA LEGENDE DE LA CARTE TOP 25 DE L'IGN

Ainsi, la variation du type d'implantation permet de représenter la nature d'un signe, mais ces types d'implantations ne suffisent pas pour pouvoir exprimer et représenter les relations qu'ont ces signes entre eux. La notion de variable visuelle est donc introduite.

Une variable visuelle est une propriété graphique capable d'exprimer des relations entre des données. Elle est caractérisée par sa « longueur », exprimant le nombre d'éléments différents capables d'être représentés en utilisant cette variable (Bertin, 1967).

Bertin (1967) propose ainsi des règles pour la sémiologie graphique en s'appuyant sur la formalisation de sept variables visuelles (Figure 12) : la localisation, la taille, la couleur, la valeur, le grain, l'orientation et la forme. Nous présentons ces variables de façon générale et insisterons sur la variable couleur dans la section suivante (e).

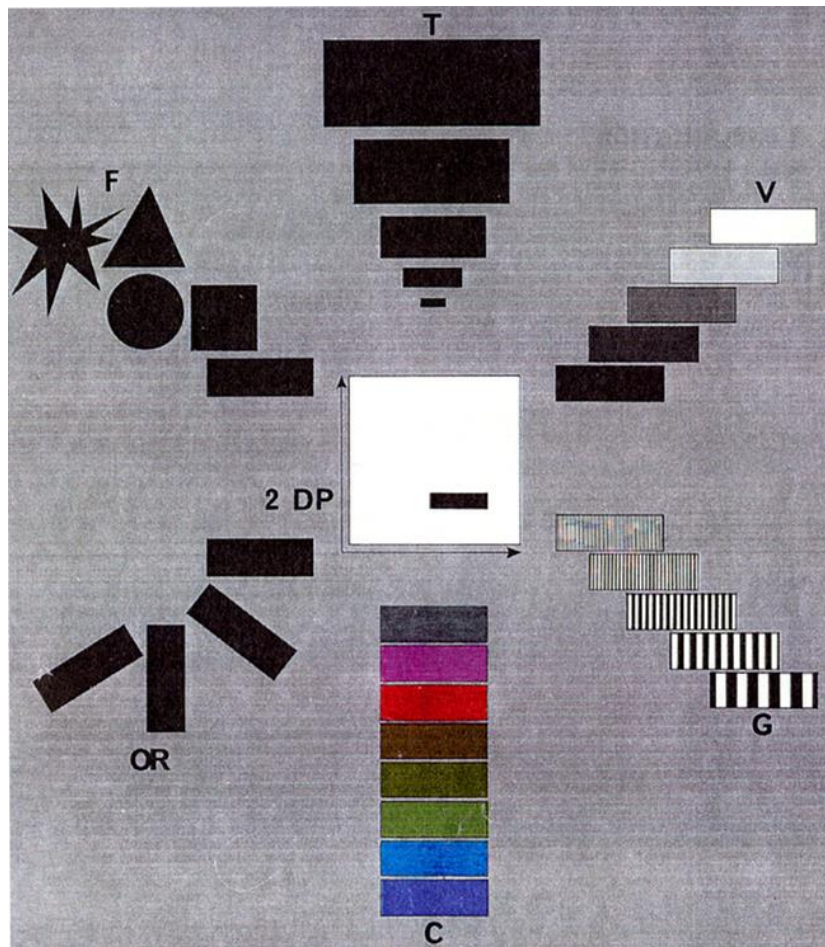


FIGURE 12 VARIABLES VISUELLES TELLES QUE DEFINIES PAR JACQUES BERTIN (BERTIN, 1967)

Ainsi, selon Bertin:

La **localisation** est la position géographique d'un symbole exprimée en coordonnées (x,y) sur le plan à deux dimensions de la carte.

La **taille** permet de percevoir les rapports de proportionnalité et donc de traduire des quantités et exprimer un ordre. Le concepteur de carte peut faire varier les dimensions d'un signe selon le type d'implantation (comme le montre la Figure 13) :

- Implantation ponctuelle : variation de la taille du symbole
- Implantation linéaire : variation de l'épaisseur de la ligne
- Implantation surfacique : variation des figures internes à la zone (les poncifs), car il n'est pas possible de modifier les dimensions de la zone elle-même

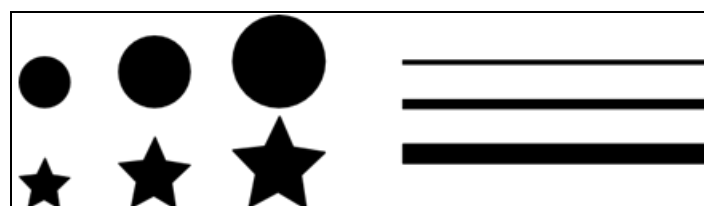


FIGURE 13 VARIATION DE TAILLE

La **valeur** est le rapport entre le noir et le blanc dans une surface donnée. Elle est exprimée en pourcentage de noir. La valeur est adaptée pour traduire une relation d'ordre. Comme le montrent les deux figures suivantes, Figure 14 et Figure 15, le concepteur de carte peut faire varier la valeur en utilisant plusieurs procédés :

- Modifier la clarté (quantités de blanc et de noir dans une couleur)
- Modifier la trame elle-même
- Modifier la distance entre les éléments d'une trame

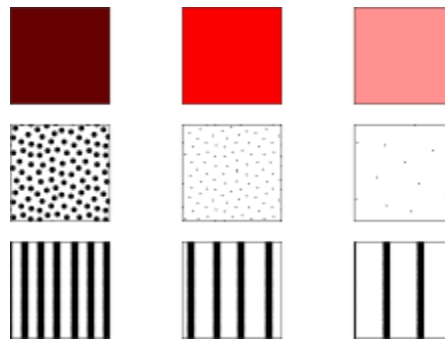


FIGURE 14 VARIATION DE VALEUR

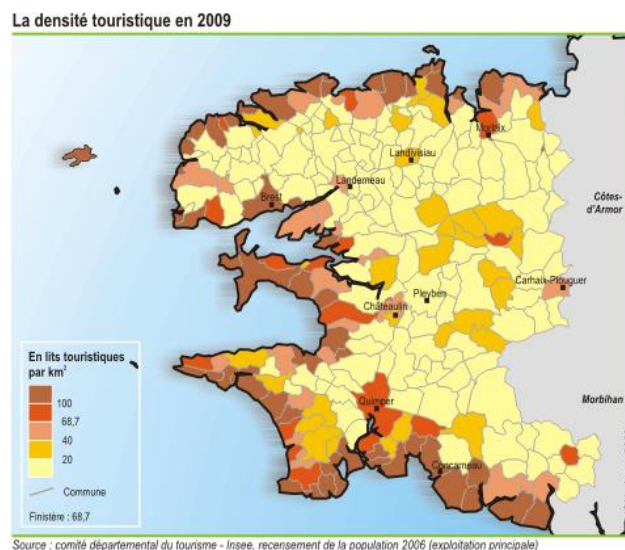


FIGURE 15 UTILISATION DE LA VALEUR (DANS LA COULEUR) POUR TRADUIRE UNE RELATION D'ORDRE

Le **grain** conserve le rapport entre les éléments graphiques et le fond blanc. Il est utilisé pour les symboles surfaciques. Sa variation différencie et ordonne les signes. Comme le montre la Figure 16, le pourcentage de gris n'est pas censé changer entre les différents grains à l'inverse de la valeur où le pourcentage de gris peut changer entre les différentes valeurs utilisées pour représenter un ordre.

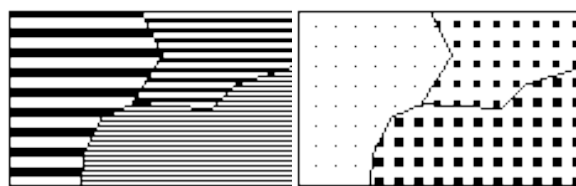


FIGURE 16 VARIATION DU GRAIN (GODARD, 2010)

La **couleur** (teinte) d'un signe est définie par son spectre. La couleur est le plus souvent utilisée pour représenter les relations d'association et de différence. Des symboles de même couleur sont perçus comme appartenant au même thème. À titre d'exemple, la Figure 17 présente quelques couleurs différentes dont chacune peut être utilisée lors de la symbolisation de thèmes différents.



FIGURE 17 VARIATION DE LA COULEUR

La **forme** est une variable principalement différentielle, elle consiste en la variation du tracé du contour des symboles. Varier la forme d'un signe en implantation ponctuelle ou linéaire consiste à en changer le contour (première ligne de la Figure 18). Varier la forme d'un signe surfacique consiste à en changer le poncif (deuxième ligne de la Figure 19).

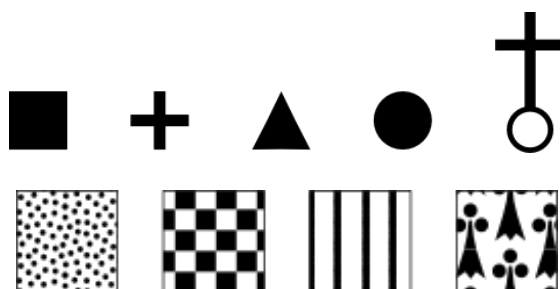


FIGURE 18 VARIATION DE LA FORME

L'**orientation** est utilisée à but de différenciation, elle peut aussi indiquer une direction géographique. Elle consiste en la différence d'angles (voir Figure 19) entre des champs créés par plusieurs signes, comme les hachures, les lignes ou les symboles ponctuels.



FIGURE 19 VARIATION DE L'ORIENTATION

Ces variables définies par Bertin (1967) transmettent les relations existant entre les données. Nous rappelons que ces relations sont de trois types : différence, ordre et association.

La sémiologie graphique a donc pour but de donner des règles permettant de construire des légendes efficaces, c'est-à-dire qui assurent une bonne association signe-sens. Si au niveau du sens un type de relation existe entre types d'objets, alors il faut choisir une symbolisation pour ces deux types d'objets qui mettent en valeur cette relation. Ainsi lors de la création de la légende, le concepteur classe les données représentées sur la carte en thèmes (espaces verts, hydrographies, etc.). Puis les différentes relations entre les signes sont exprimées au sein des différents thèmes. Les signes peuvent être associés par leurs couleurs (teinte) et ordonnés à l'aide de la valeur ou de la taille. La relation de différence entre des types de données géographiques est établie par la représentation de ces derniers à l'aide de signes qui se différencient par leur type d'implantation (ponctuelle, linéaire, surfacique), leur forme ou leur couleur (teinte).

Il est aussi possible d'exprimer une relation d'association par une certaine variation de forme. Dans la Figure 20, trois types de lieux de cultes sont symbolisés par trois signes. Les lieux de cultes sont différents, mais ils appartiennent au même thème ; les symboles ponctuels vont donc varier, mais pas de manière radicale afin de conserver une certaine ressemblance graphique entre eux.

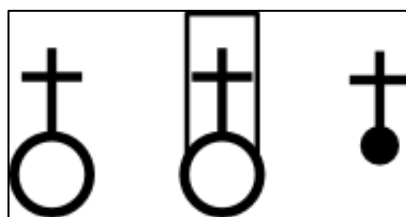


FIGURE 20 DES SYMBOLES QUI SE RESSEMBLENT. DE GAUCHE A DROITE : CHAPELLE, EGLISE, CALVAIRE (LEGENDE IGN)

Par exemple dans le thème « Routes », il est possible de classer les signes selon la capacité des voies : autoroute, route nationale, route urbaine, route privée, en faisant varier la largeur et la valeur (contenue dans la couleur en allant du jaune au rouge).

Dans le thème « Bâtiments de culte », les signes des différents sites religieux sont disposés côté à côté sur la légende.

Les signes qui ne sont pas liés par des relations d'ordre ni d'association sont automatiquement en relation de différenciation avec tous les autres signes. Cette différenciation est exprimée grâce à la variation des types d'implantation et/ou à la variation de variables visuelles comme la couleur ou la forme.

En combinant entre elles plusieurs variables, on risque fortement de diminuer l'efficacité visuelle. En effet, la mauvaise utilisation de ces variables peut entraîner des erreurs de représentation (Monmonier, 1991). Ainsi, une variable visuelle peut être inadaptée pour exprimer la relation traitée, par exemple, la variable forme n'est pas adaptée pour exprimer une relation d'ordre. Un autre type d'erreurs fréquent est la mauvaise mise en œuvre d'une variable visuelle, un exemple parlant est l'utilisation de dégradés de valeur non réguliers, la couleur étant certainement la variable la plus délicate à utiliser.

Malheureusement, ces règles ne sont pas souvent intégrées dans les outils standards (SIG) de géovisualisation, ce qui ouvre la porte à de nombreuses erreurs de représentation dans les cartes et conduit donc à construire des cartes inefficaces.

Généralités sur la couleur

L'une des variables visuelles les plus utilisées, de par l'étendue des variations qu'elle propose, est la couleur. Une couleur peut être définie comme la perception d'une ou d'une composition de longueurs d'ondes de lumière auxquelles l'œil humain est sensible. L'œil humain est sensible à un ensemble d'ondes électromagnétiques comprises entre 380 et 1000 nanomètres. Isaac Newton est le premier à avoir identifié la décomposition de la lumière en un spectre de couleurs s'étalant du rouge au violet (voir Figure 21). Les ondes électromagnétiques se trouvant au-delà du spectre sont dites « infrarouges » pour les ondes supérieures à 780/1000nm et « ultraviolets » pour celle inférieures à 380nm (Newton, 1704).



FIGURE 21 SPECTRE DE LA LUMIERE PERCEPTIBLE PAR L'ŒIL HUMAIN

Le terme « couleur » peut se décliner en deux variantes : est dite « couleur » toute longueur d'onde présente dans le spectre de lumière, mais également toute couleur qui est composée d'autres couleurs, comme le blanc qui est la somme des couleurs du spectre dans la lumière émise, ou le noir qui est l'absence de couleurs et donc l'absence de lumière parvenant à l'œil.

Ces définitions nous seront utiles plus tard lorsque nous aborderons le sujet des couleurs désagréables sur une carte.

Parmi les couleurs perceptibles par l'œil humain, certaines sont nommées « couleurs primaires », et par leur mélange, elles permettent de reproduire le reste des couleurs. Le mélange de ces couleurs peut être réalisé de deux manières différentes : la synthèse additive et la synthèse soustractive.

Dans la synthèse additive, la combinaison de lumières colorées permet d'aboutir à une lumière de couleur différente de celles des lumières initiales. Nous parlons ici de synthèse « additive » car nous ajoutons de la lumière qui parviendra à l'œil. Comme le montre la Figure 22, les couleurs primaires de la synthèse additive sont le rouge, le vert et le bleu. L'addition de ces trois couleurs aboutit à la couleur blanche ; l'absence de ces trois couleurs, à la couleur noire. La synthèse additive est utilisée par exemple pour la création des couleurs sur les postes de télévision.

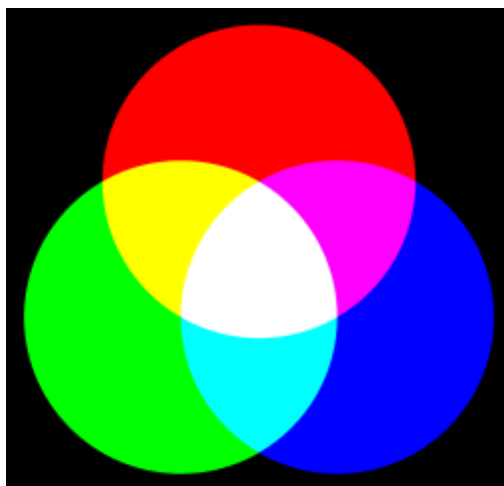


FIGURE 22 SYNTHESE ADDITIVE ET COULEURS PRIMAIRES

Dans la synthèse soustractive, c'est la combinaison de matières colorées qui permet d'aboutir à une couleur différente de celles des matières initiales. Nous parlons ici de synthèse « soustractive » car chaque matière élimine des couleurs de la lumière qui parviendra à l'œil. C'est pourquoi la combinaison de toutes les couleurs primaires permet d'obtenir du noir. Lorsqu'on voit du bleu sur un plan éclairé par une lumière blanche, c'est que c'est la composante bleu de la lumière blanche qui est renvoyée, le reste est absorbé. Ces couleurs primaires sont le cyan, le magenta et le jaune (voir Figure 23). Ce sont les couleurs primaires utilisées en peinture et en cartographie papier pour composer des couleurs.



FIGURE 23 SYNTHESE SOUSTRACTIVE ET COULEURS PRIMAIRES

Comme vu précédemment, les couleurs sont très utilisées dans l'édition de cartes géographiques. Hormis l'esthétique, leur fréquente utilisation est surtout due au large intervalle de variations possibles de ces couleurs. Les variations peuvent se faire sur trois principaux paramètres : la teinte, la valeur et la saturation.

La teinte caractérise « la sensation colorée » d'un élément perçue par l'œil humain. En cartographie elle est utilisée pour différencier les thèmes entre eux. Un thème représenté en vert est différent sémantiquement d'un thème représenté en bleu ou en rouge.

La valeur caractérise l'intensité lumineuse d'un élément, perçue par l'œil humain. Elle caractérise le fait qu'une couleur peut être claire ou foncée, elle est d'ailleurs également appelée clarté ou luminance. La variation de la valeur permet de créer des relations d'ordre pour des couleurs de même teinte. Il est ainsi possible, dans les cartes statistiques, de représenter une plage de chiffres en faisant varier la couleur sur sa valeur. On remarquera qu'on utilisera souvent davantage les termes clarté ou luminance lorsqu'on traite la couleur en synthèse additive et valeur lorsqu'on la traite en synthèse soustractive. En cartographie, même si les cartes sur écran utilisent la synthèse additive des couleurs, la terminologie est souvent empruntée à la synthèse soustractive qui correspond aux procédés cartographiques historiques.

La saturation caractérise la « pureté » d'une couleur, ou encore le taux de gris qui la compose. Ainsi, une couleur saturée ne comporte pas de gris et est donc très vive, à l'inverse, une couleur totalement non-saturée est représentée en niveaux de gris. La saturation permet en cartographie de créer une hiérarchie des symboles. Ainsi, les symboles dont la couleur est plus saturée que celles des autres symboles seront perçus en premier. A l'opposé, les objets peu importants sont en teintes grisées, presque sans couleur. La quantité de gris dans les couleurs permet donc potentiellement d'établir une hiérarchie entre thèmes.

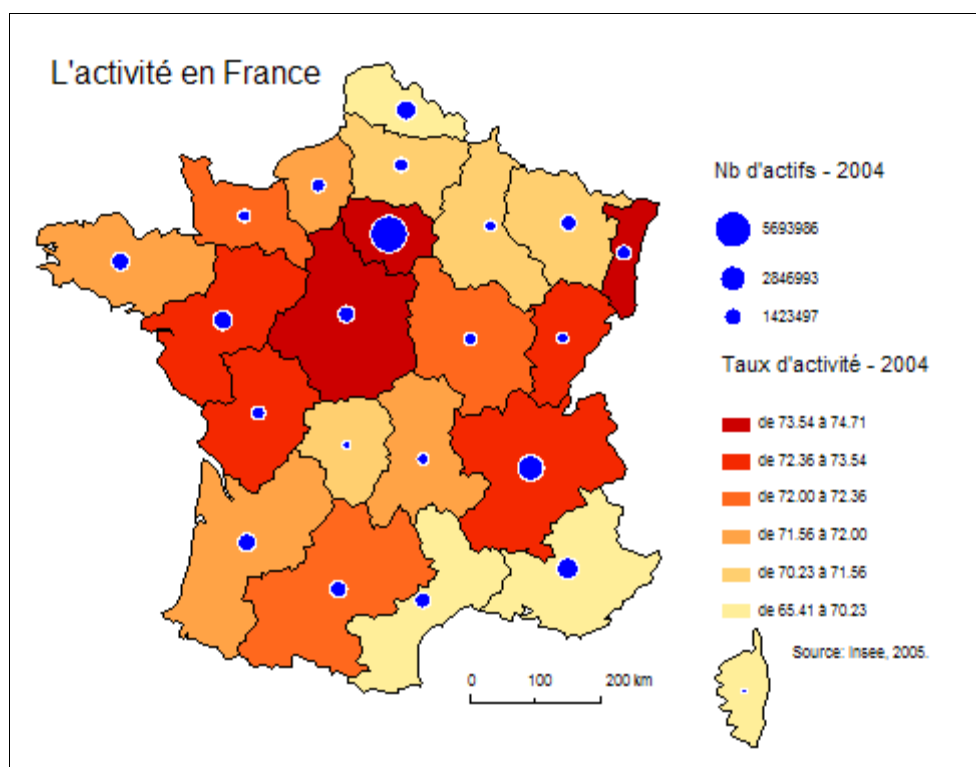


FIGURE 24 L'ACTIVITE EN FRANCE EN 2004 (SOURCE DOCUMENTATION DU LOGICIEL ARCTIQUE)

Dans la Figure 24, par exemple, les variables de taille, de couleur et de valeur sont utilisées. Le thème « nombre d'actifs » est représenté par des symboles ponctuels sous forme de disques bleus dont la taille change en fonction de la quantité, et le thème « taux d'activité » par des symboles surfaciques avec une gradation de la proportion de rouge (valeur) dans une teinte jaune de base. Il est donc possible de réaliser quelques comparaisons visuelles des

régions assez facilement. Par exemple on peut remarquer que le Nord-Pas-de-Calais a un faible taux d'activité en dépit du fait qu'elle ait un nombre d'actifs équivalent de celui de la région Loire-Atlantique qui elle a un taux d'activité plus élevé.

Organisation des couleurs

Afin de faciliter le repérage des couleurs en vue de leur exploitation, plusieurs chercheurs ont proposé différentes organisations des couleurs toutes disposées en cercle.

Ainsi, le physicien et mathématicien suédois Aron Sigrid Forsius (1611), fut le premier connu à avoir proposé une organisation sphérique des couleurs (voir Figure 25 et Figure 26). Il classe donc, dans son ouvrage *Physica* (1611), les couleurs en « couleurs primaires » qui sont le blanc et le noir, « couleurs moyennes fondamentales » qui sont le rouge, le bleu, le vert, le jaune et le gris ; et le reste des couleurs qui sont des « gradations » de ces 5 couleurs vers le blanc ou vers le noir.

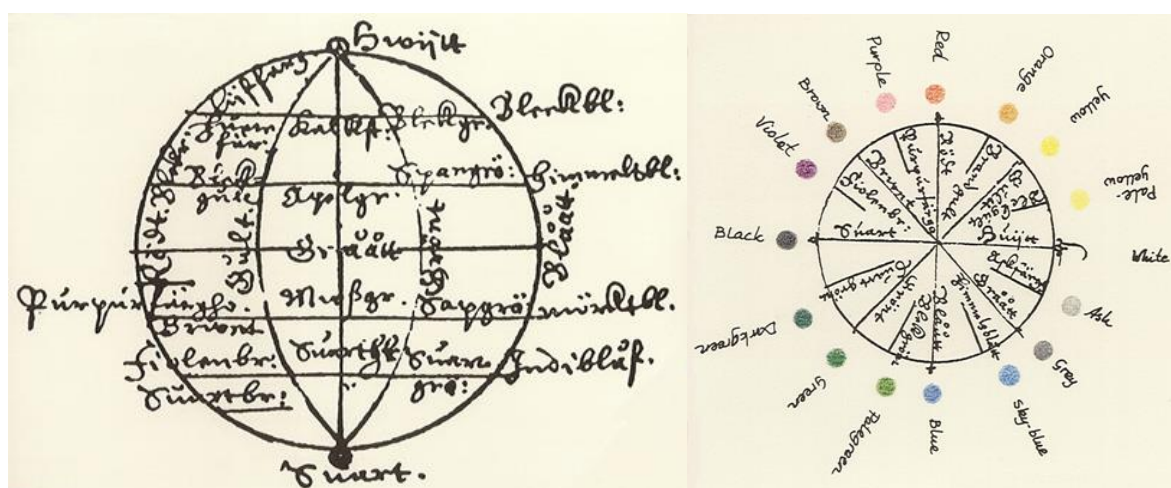


FIGURE 25 ORGANISATION SPATIALE DES COULEURS EN CERCLE SELON ARON SIGRID FORSIUS
(EN SUEDOIS, TRADUIT EN ANGLAIS)

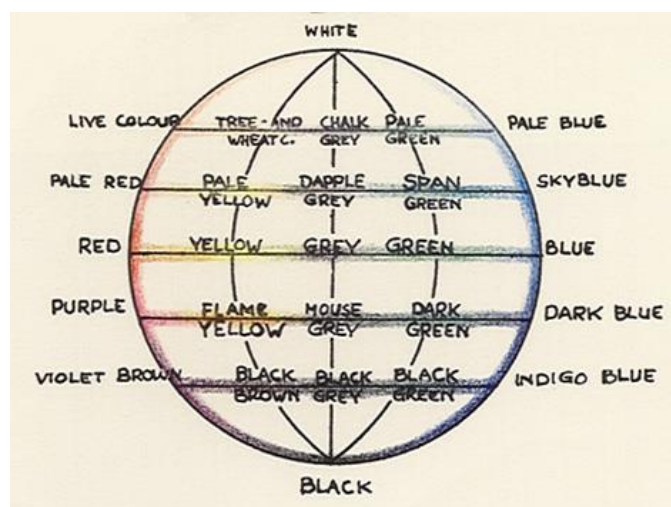


FIGURE 26 TRADUCTION ANGLAISE DE LA SPHERE DE ARON SIGRID FORSIUS (1611)

Suite à Aron Sigrid Forsius, Robert Fludd, médecin et physicien anglais, propose également une organisation spatiale des couleurs en cercle dans son ouvrage « *Medicina catholica* » (1629-1631)¹⁴. Il propose un cercle chromatique divisé en 7 secteurs (Figure 27) : Le noir et le blanc y sont représentés côte à côte, et le rouge leur est diamétralement opposé ; puis il place le bleu, le vert, le jaune et l'orange sur le reste des secteurs. Il représente également un deuxième niveau de son cercle sur lequel il inscrit le taux de « clarté » et « d'obscurité » que contiennent ces couleurs. Ainsi, le blanc ne contient que de la clarté, tandis que le noir ne contient que de l'obscurité. La clarté et l'obscurité s'équilibrent dans la couleur verte selon Fludd.

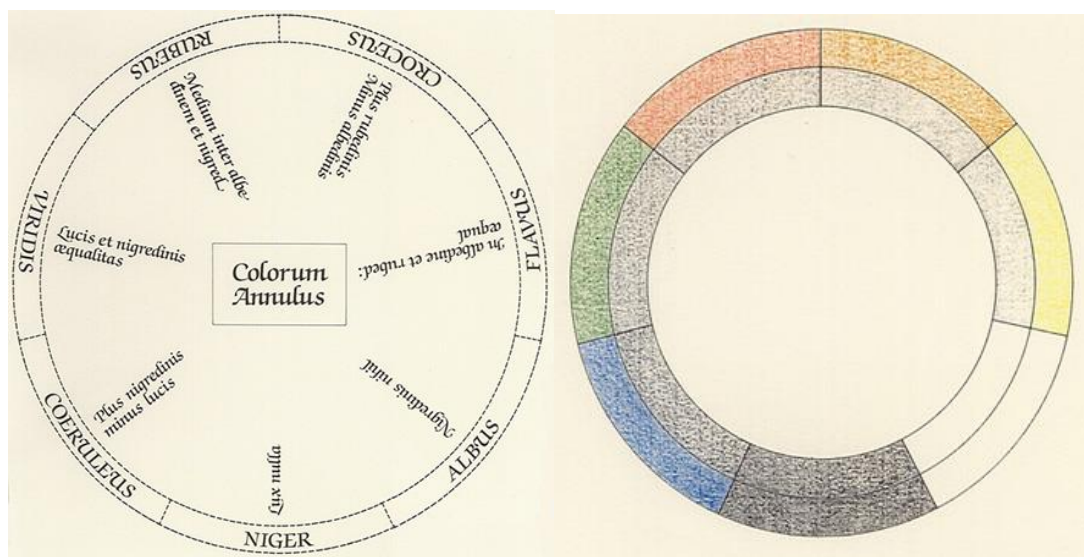


FIGURE 27 ORGANISATION DES COULEURS EN CERCLE SELON ROBERT FLUDD (1629-1631)

Newton est le premier scientifique connu à avoir démontré que la lumière blanche peut se décomposer en plusieurs couleurs, qui combinées, recomposent la lumière blanche. Il place alors les couleurs spectrales obtenues par cette décomposition sur un cercle chromatique (Figure 28). Le rouge, l'orange, le jaune, le vert, le bleu, l'indigo et le violet sont placés dans l'ordre de leur apparition sur le spectre de lumière ; le blanc est positionné au centre du cercle signifiant qu'il résulte de l'addition des couleurs ; les secteurs ont une taille proportionnelle à l'intensité de la couleur associée.

¹⁴ Référence à la BNF Notice n° FRBNF30444928

<http://catalogue.bnf.fr/servlet/biblio?idNoeud=1&ID=30444928&SN1=0&SN2=0&host=catalogue>

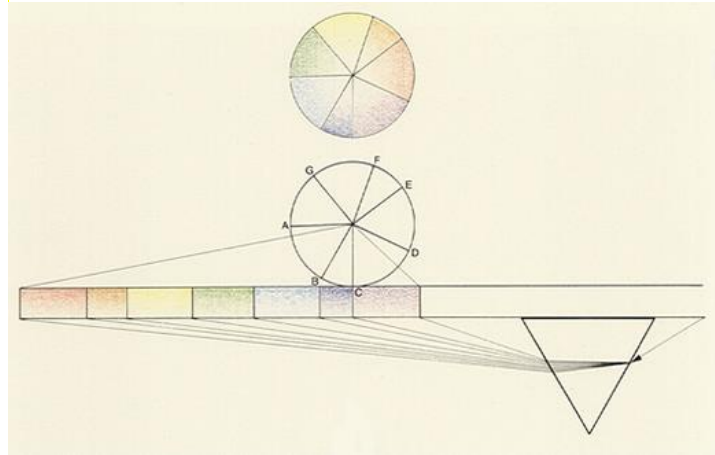
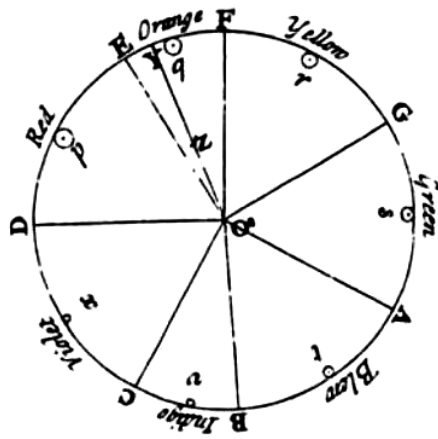


FIGURE 28 CERCLE CHROMATIQUE DE NEWTON (1704)

Johannes Itten (1967) choisit 3 couleurs primaires : le rouge, le jaune et le bleu. Ces couleurs ne peuvent être composées par le mélange d'autres couleurs, et le mélange de ces couleurs en proportions égales aboutit à la couleur noire. Puis il dispose d'autres couleurs sur le cercle qui sont le mélange de ces couleurs primaires. Il répartit les couleurs sur le cercle de manière à les représenter selon leur complémentarité : les couleurs complémentaires sont diamétralement opposées. Ensuite il qualifie les couleurs allant du rouge au jaune de couleurs chaudes, et celles du vert au violet de couleurs froides. La Figure 29 illustre ces différentes notions.

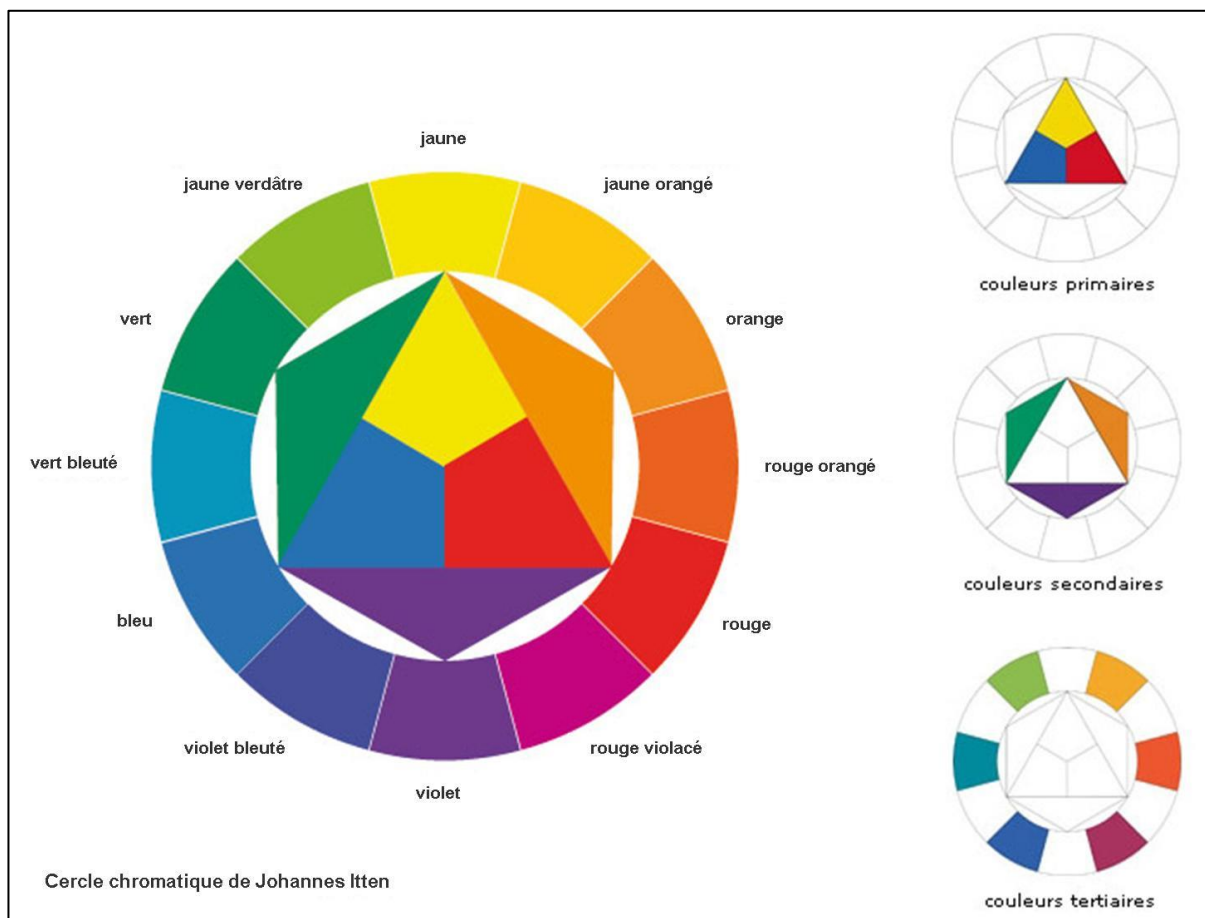


FIGURE 29 CERCLE CHROMATIQUE DE JOHANNES ITTEN ET CLASSIFICATION DES COULEURS (1967)

Contrastes de couleurs selon Itten

Selon Johanness Itten (1967) « on parle de contraste quand, entre deux effets de couleurs à comparer, on peut établir des différences ou intervalles sensibles ». Dans son livre *Art de la couleur* (1967) Itten introduit sept contrastes colorés :

Contraste de la couleur en soi : « Le contraste de la couleur en soi est le plus simple des sept contrastes de couleurs » (Itten, introduction). Il est possible de le représenter en utilisant trois couleurs. Le contraste est maximal lorsque les trois couleurs sont des couleurs primaires (Figure 30), et il est atténué lorsqu'on s'éloigne des couleurs primaires en rajoutant du blanc ou du noir (Figure 31).



FIGURE 30 CONTRASTE MAXIMAL

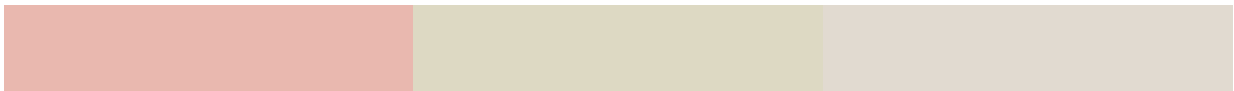


FIGURE 31 CONTRASTE ATTENUÉ PAR L'AJOUT DE BLANC

Contraste des complémentaires : « Deux couleurs pigmentaires qui mélangées, donnent du gris-noir neutre, nous les désignons sous le nom de couleurs complémentaires » (Itten, p.78). Par exemple dans le cercle de la Figure 29, les couleurs jaune verdâtre et rouge violacé sont des couleurs complémentaires.

Contraste chaud-froid : l'utilisation d'une couleur chaude (rouge, orange, jaune) avec une couleur froide (bleu, vert, violet) crée un contraste entre les objets. La Figure 32 montre des différences d'intensité entre les contrastes chaud-froid.



FIGURE 32 LES DEUX COULEURS À DROITE ONT UN CONTRASTE CHAUD-FROID PLUS ATTENUÉ QUE CELUI DES DEUX COULEURS À GAUCHE QUI ONT UN CONTRASTE PLUS FORT

Contraste clair-obscur : ce contraste oppose deux couleurs dont l'une est plus claire que l'autre. La Figure 33 montre des différences d'intensité entre les contrastes clair-obscur.



FIGURE 33 LES DEUX COULEURS DE GAUCHE POSSEDENT UN PLUS FORT CONTRASTE CLAIR-OBSCUR QUE CEUX À DROITE

Contraste de qualité ou de saturation : « Par la notion de qualité de la couleur, nous entendons le degré de pureté ou de saturation des couleurs. Nous désignons par contraste de qualité l'opposition des couleurs saturées, lumineuses, et de couleurs éteintes, ternes » (Itten, p.96). La

Figure 34 montre l'aspect relatif du contraste de qualité entre des niveaux de saturation différents d'une même teinte.



FIGURE 34 DIFFERENTS NIVEAUX DE SATURATION D'UNE MEME TEINTE (ORANGE MANDARINE).UNE COULEUR TERNE (PAR EXEMPLE CELLE DU MILIEU) PEUT PARAÎTRE LUMINEUSE SI ELLE EST MISE A COTE D'UNE AUTRE COULEUR PLUS TERNE (DEUXIEME A PARTIR DE LA DROITE)

Contraste de quantité (voir Figure 35) : C'est le « rapport de grandeur de deux ou de plusieurs taches de couleurs. C'est l'opposition de beaucoup et peu ou grand et petit » (Itten, p.96)



FIGURE 35 REPRESENTATION DU CONTRASTE DE QUANTITE

Contraste simultané : Ce contraste est le « phénomène qui fait que notre œil, pour une couleur donnée, exige en même temps, donc simultanément, la couleur complémentaire, et qu'il l'engendre lui-même si elle n'est pas donnée » (Itten, p.87). Dans la Figure 36 on voit le carré du centre légèrement vert alors qu'il est gris, parce que le rouge qui l'entoure incite notre œil à construire sa couleur complémentaire (donc du vert)

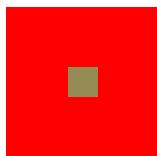


FIGURE 36 EXEMPLE DE CONTRASTE SIMULTANE DANS LEQUEL LES COULEURS PARAISSENT INSTABLES

Les travaux d'Itten sur les couleurs sont ceux sur lesquels reposent les recherches du laboratoire COGIT de l'IGN dans lequel se déroule cette thèse.

La généralisation

La généralisation est le processus qui permet de réduire la quantité de l'information géographique représentée sur la carte (exemples Figure 37 et Figure 38). Des processus de généralisation sont souvent mis en œuvre en cartographie, soit de façon manuelle, soit de façon semi-automatique.

La généralisation devient nécessaire lorsque la densité des symboles affichés sur la carte augmente. La densité peut augmenter à cause de la réduction de l'échelle ou par l'ajout de nouvelles données sur la carte. Une carte mal ou non généralisée peut être illisible. C'est parfois ce qu'il se passe lorsqu'on réduit l'échelle d'une carte sur Internet.

La généralisation se déroule en trois étapes : la **sélection** permet de réduire la quantité d'information en choisissant les données à conserver en fonction de l'objectif de la carte ; la **schématisation** permet de simplifier la forme des objets pour conserver l'information tout en

diminuant la précision de représentation ; l'**harmonisation** permet de rendre cohérent l'aspect visuel général de la carte en respectant les relations de proximité entre les objets par exemple. On notera que les étapes ne sont pas nécessairement séquentielles et qu'il faut s'occuper d'harmonie pendant les opérations de sélection et de schématisation si on veut, à la fin du processus, préserver l'aspect visuel général.

René Cuenin (1972), résume la généralisation comme l'« opération qui, par sélection, schématisation et harmonisation, reconstitue sur une carte la réalité de la surface représentée dans ses traits essentiels en fonction du but de la carte, de son thème, de son échelle et des particularités de la région cartographiée ». Historiquement la généralisation était réalisée à la main. Depuis que les données sont numériques, on applique une série d'algorithmes sur les objets. On appelle **opération** une transformation type. A chaque opération correspondent de nombreux algorithmes. La Figure 37 présente les principales opérations.

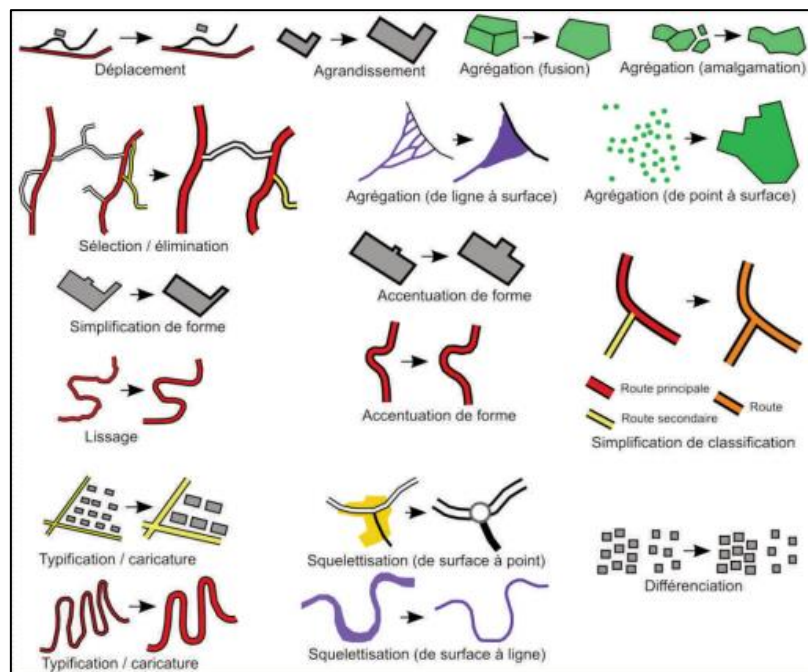


FIGURE 37 QUELQUES EXEMPLES D'OPERATIONS DE GENERALISATION (MUSTIERE, 2001)

La Figure 38 montrent les différents résultats cartographiques obtenus en faisant varier les processus de généralisation lors de la réduction de l'échelle.

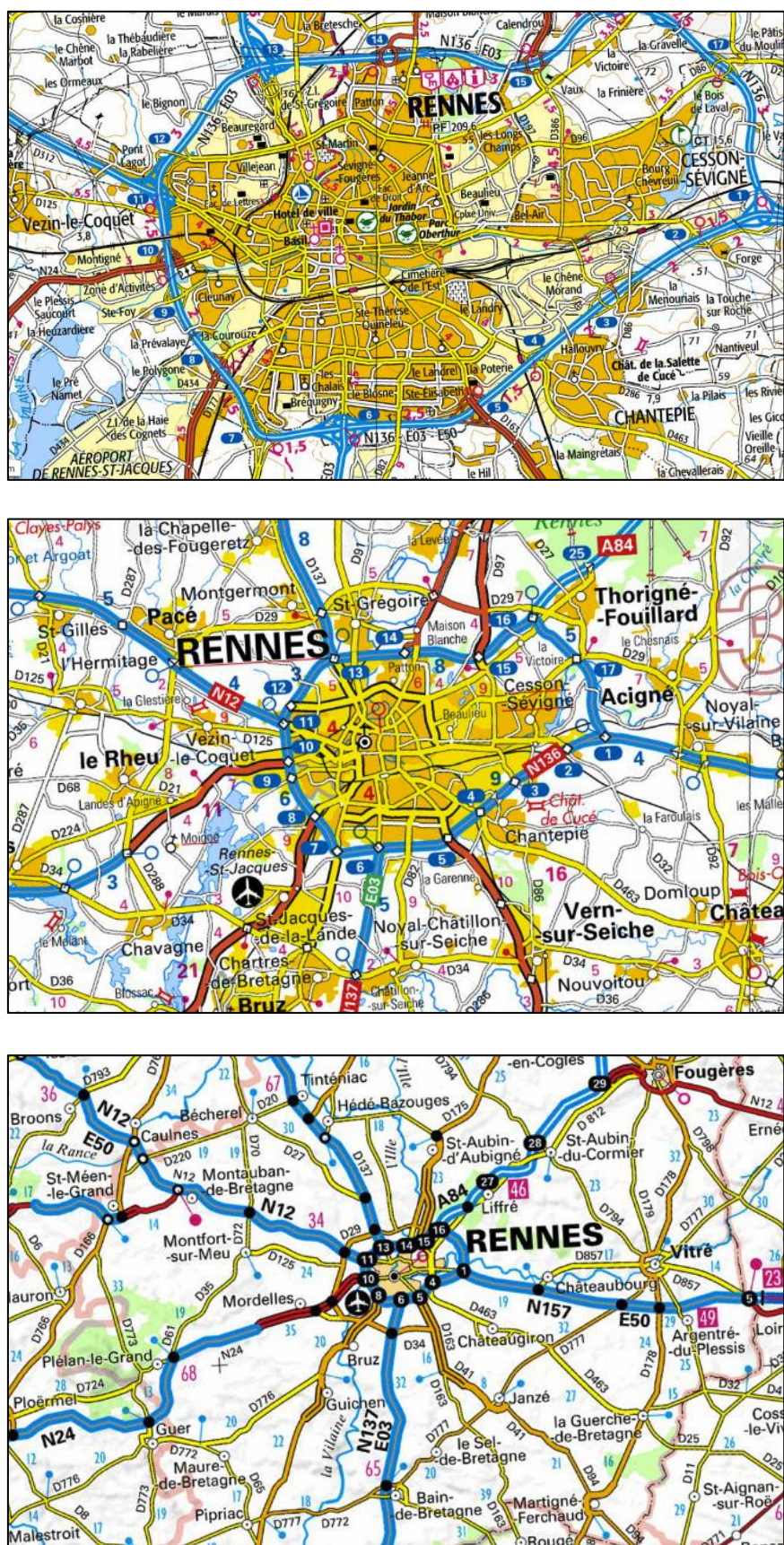


FIGURE 38 DIFFERENTES REPRESENTATIONS DE LA REGION DE RENNES OBTENUES PAR GENERALISATION

1.2. DE LA CARTE PAPIER A LA CARTE SUR ECRAN

Plus récemment, la cartographie s'est démocratisée par la profusion de données géographiques numériques disponibles et notamment par l'explosion des sites web cartographiques. La cartographie est également passée d'une représentation papier à une représentation numérique visualisable sur écran manipulable et parfois modifiable par n'importe quel utilisateur. Dans la plupart des outils cartographiques récents, il est possible pour l'utilisateur de construire lui-même une carte sur mesure adaptée à ses besoins en superposant des couches de données. Celles-ci peuvent même provenir de sources hétérogènes. Ceci est actuellement possible grâce à plusieurs outils, dont le Géoportail et Google Maps.

La géovisualisation

Depuis la fin des années 1990, nous assistons à une augmentation sensible du contenu cartographique sur internet – atlas de référence, atlas éducatifs, topographiques, nationaux et thématiques (Kraak, 2001). Ce contenu cartographique est diffusé par des sites web contenant des cartes. Chacun de ces sites web propose plus ou moins d'interactivité. Les multiples possibilités d'évolutions ont conduit à l'émergence d'un nouveau domaine de recherche: la géovisualisation. Les cartes traditionnelles fournissent une capacité d'exploration limitée puisqu'elles sont statiques. Ces cartes peuvent être considérées comme des sources de contenu géographique puisqu'elles représentent l'espace et des variables associées.

Pourtant, aujourd'hui, l'information géographique est stockée dans des bases de données géographiques distinctes des cartes topographiques. Ce sont ces bases de données qui sont utilisées par le processus de construction des cartes. Cette dématérialisation offre à l'information géographique les avantages des données numériques qui sont la facilité de manipulation, de diffusion, de stockage et de duplication. La carte n'a plus le rôle d'archivage exhaustif d'informations, l'ensemble des bases de données géographiques l'en libère (Mustière, 2001). De ce fait, les SIG actuels autorisent la construction de cartes plus interactives. Ils permettent par exemple de voir les différentes couches de la carte, de zoomer ou de de-zoomer, de changer l'apparence visuelle de la carte en modifiant des couleurs ou des symboles (Jiang et al., 2003).

La géovisualisation, terme qui est la combinaison de « géographie » et de « visualisation », est l'ensemble de pratiques et de techniques qui profite des possibilités des ordinateurs pour faciliter différentes manipulations d'informations géographiques comme l'exploration et l'interrogation de ces informations géographiques, mais aussi la construction de cartes, la manipulation de cartes (modification des données, des représentations, de l'emprise, de l'échelle) en temps réel (MacEachren et al., 1997). Menno Jan Kraak (2008) définit la géovisualisation comme le processus qui inclut la capacité à créer une carte et d'autres graphiques, en partant de données géographiques relativement mal connues. Ces cartes et graphiques, qui doivent être accessibles dans un environnement interactif, stimulent la pensée de l'expert et doivent aider à la bonne prise de décision : « *the process that involves a discipline expert creating maps and other graphics while dealing with relatively unknown*

geographic data. (...) As such, the maps and graphics, which should be available in an interactive viewing environment, stimulate the visual thinking of the expert and should support (spatial) decision making ».

La géovisualisation s'appuie sur les connaissances d'autres disciplines, dont la cartographie, l'analyse d'image, la visualisation d'information, et l'analyse exploratoire des données, pour fournir des théories, des méthodes ainsi que des outils pour l'exploration visuelle, l'analyse, la synthèse et la présentation de données contenant des informations géographiques (Dykes et al., 2005).

Nouvelles variables visuelles

Le portage des cartes sur écran permet d'avoir plus de liberté concernant les techniques de visualisation de ces cartes. D'autres recherches ont été faites dans ce domaine, certains auteurs considérant incomplètes les variables visuelles proposées par Bertin. Fabrikant (2005) propose ainsi l'intégration de nouvelles variables visuelles, de variables sonores et de transitions visuelles dynamisant la visualisation de ces cartes. Robinson (2009) propose de nouvelles méthodes de mise en évidence visuelle (en utilisant la couleur, la transparence, les contours, etc.) qui peuvent être utilisées en géovisualisation.

Morrison (1974) ajoute une nouvelle variable *saturation*, que Bertin incluait avec la teinte dans la variable *couleur*. En effet, grâce aux avancées techniques, il devient important de séparer la variable *saturation* de la variable *couleur* puisque les outils de production de carte assistée par ordinateur permettent, dès cette époque, de contrôler indépendamment ces trois attributs de la couleur : la valeur, la teinte et la saturation. La confusion vient souvent du fait que 'couleur' signifie parfois la couleur que l'on voit et qui intègre la teinte, la valeur et la saturation, alors que d'autres fois elle est synonyme de la teinte.

D'autres recherches ont abouti à la proposition de nouvelles variables comme la variable *texture* de Caivano (1990), ou les variables *transparence*, *résolution*, et *focalisation* (inspirée de la photographie, cette dernière définit le degré de flou/netteté d'un symbole) qui sont proposées par MacEachren (1995). La Figure 39 montre comment des objets superposés peuvent être lus sur la carte grâce à l'utilisation de la variable visuelle *transparence*.

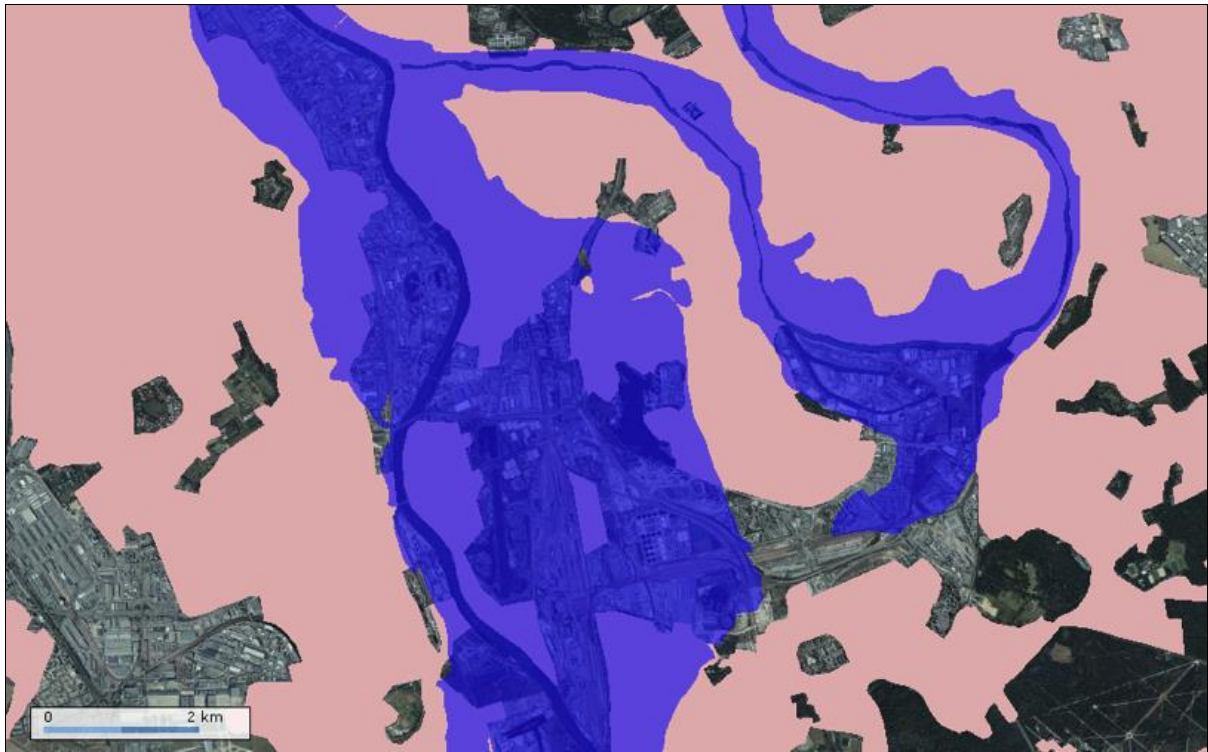


FIGURE 39 UN EXEMPLE D'UTILISATION DE LA TRANSPARENCE POUR RESOUDRE LE PROBLEME DE LA SUPERPOSITION D'OBJETS

2. SYSTEMES DE CONSTRUCTION DE CARTES PERSONNALISEES

2.1. GEOPORTAILS

« Géoportail » est un terme relativement récent qui se compose du terme « portail » et du préfixe « Géo ». Un portail web est *«un site web qui offre une porte d'entrée unique sur un large éventail de ressources et de services (courrier électronique, forum de discussion, espaces de publication, moteur de recherche) centrés sur un domaine ou une communauté particulière»*¹⁵. Un Géoportail est défini donc comme *«un site web présentant un point d'entrée sur le web à des produits géographiques»* (P.A.J. van Oort et al., 2009), ou plus simplement un site web sur lequel des données géographiques sont disponibles pour les visiteurs du site.

Les Géoportails s'adressent au grand public, et lui facilitent l'accès aux données géographiques. Ils démocratisent la manipulation et la construction de cartographies ; offrent de nombreux services comme la recherche, l'affichage ou la construction de cartes et offrent, entre autres, la possibilité d'agréger des données.

Ils mettent ainsi au service des internautes un ensemble de techniques leur permettant de produire et de manipuler des données géographiques, de manipuler et d'interagir avec des cartes pour modifier les données représentées ainsi que la représentation elle-même de ces données comme les couleurs, l'ordre de superposition des couches, l'échelle et le niveau de zoom, ou encore l'emprise terrestre cartographiée. Ils permettent donc aux utilisateurs non spécialistes de réaliser puis de distribuer (s'ils le souhaitent) des cartes géographiques qui répondent à leurs besoins spécifiques.

En outre, ils mettent à disposition des développeurs un ensemble d'outils et d'API (Application Programming Interface) leur permettant de faire appel à l'expertise du Géoportail et d'intégrer les résultats produits par ce Géoportail dans des applications tierces.

Un grand nombre de Géoportails existent, certains sont français comme le GéoPortail¹⁶, conçu et mis à jour par l'IGN (données) et le BRGM (métadonnées), le Géolittoral¹⁷ ou encore le Géoportail de l'APUR¹⁸.

Géoportails propriétaires

Les Géoportails propriétaires sont des Géoportails dont la mise à jour dépend étroitement des entreprises qui les réalisent, les données présentées étant la propriété de l'éditeur. Les plus

¹⁵ http://fr.wikipedia.org/wiki/Portail_web

¹⁶ <http://www.geoportail.fr/>

¹⁷ <http://www.geolittoral.equipement.gouv.fr/>

¹⁸ <http://www.apur.org>

connus sont Google Maps (Figure 40), Bing Maps (Microsoft) et le Géoportail du MEDDE¹⁹.

Tous les Géoportails ne proposent pas les mêmes données ni les mêmes services. Google Maps et Bing Maps couvrent une grande partie du monde, tandis que le Géoportail ne couvre que la France métropolitaine. Il est également possible de faire des recherches et calculs d'itinéraires sur Google Maps et Bing Maps, mais pas sur le Géoportail. D'un autre côté, il est possible sur le Géoportail d'afficher différentes couches de données disponibles par défaut et de modifier leur taux de transparence ainsi que l'ordre de leur superposition, ce qui n'est pas le cas avec les deux autres portails.

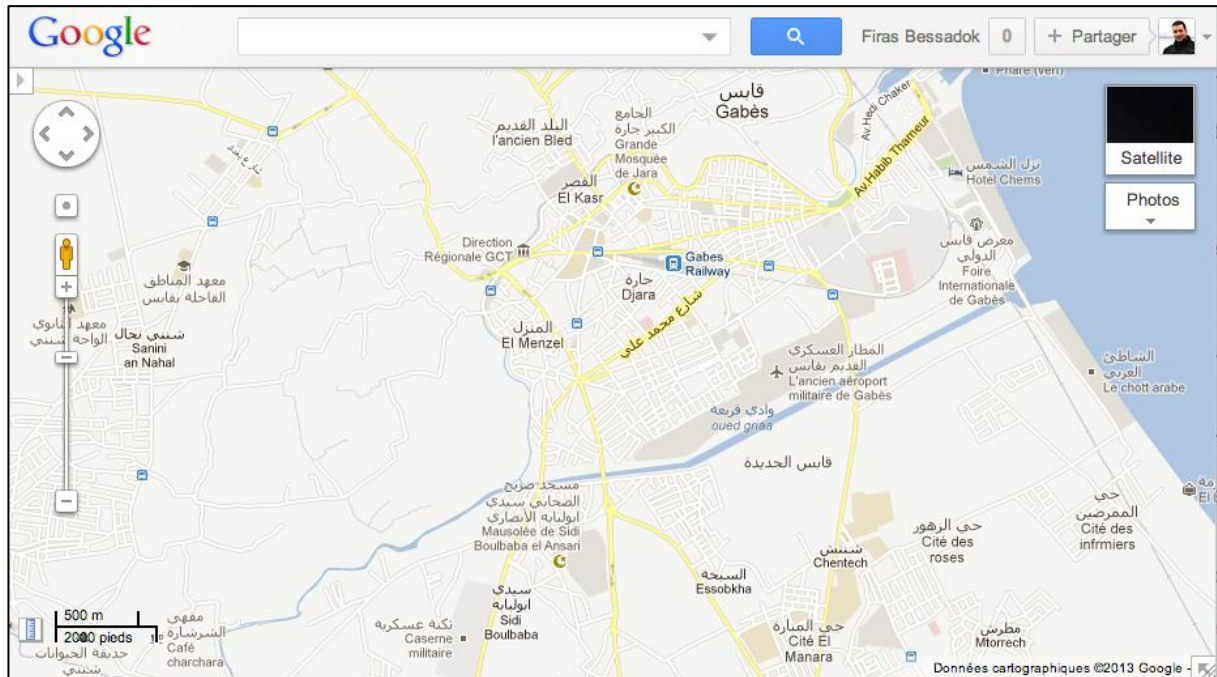


FIGURE 40 LA CARTE DE LA REGION DE GABES (TUNISIE) SUR LE SERVICE GOOGLE MAPS

Géoportails collaboratifs

L'année 2005 fut l'année de l'explosion du concept Web 2.0. Le web s'est vu rajouter une couche de socialisation afin de permettre aux internautes d'interagir entre eux, de réagir à des événements ou de commenter des produits. Les données présentes sur le web ne sont plus diffusées de manière verticale (le webmaster crée le contenu, en lecture seule, que les internautes consultent), mais de manière horizontale (le webmaster installe une plateforme sur laquelle le contenu est créé et édité par lui-même et les internautes). Les réseaux sociaux se sont multipliés (*copain d'avant, facebook, twitter*, etc.), et certains sites web initialement non-interactifs ont à leur tour ajouté une couche de socialisation à leurs services (*Amazon, Ebay*, etc.).

¹⁹ Le maître d'ouvrage du Géoportail est le ministère de l'environnement (MEDDE). Les maîtres d'œuvre sont l'IGN et le BRGM. Les données sur le Géoportail appartiennent à de multiples institutions françaises.

Le maître mot des réseaux sociaux est la communauté (la communauté des utilisateurs de leurs services). Sans sa communauté, un réseau social n'existerait pas. La communauté interagit, commente, et produit de l'information. Une communauté peut s'organiser pour réaliser une tâche commune ou pour produire de l'information d'une façon collaborative.

Un des services collaboratifs les plus célèbres est *Wikipédia*, l'encyclopédie libre. Wikipédia est une encyclopédie consultable librement, et modifiable par tous ses lecteurs. On note qu'il faut s'enregistrer pour modifier les contenus (sinon l'adresse IP de l'ordinateur est conservé) et que des conseils sont donnés pour améliorer les contributions.

Dans un service propriétaire, les données appartiennent à l'entreprise. Pour pouvoir les manipuler il faudra acquérir une licence d'utilisation. La diffusion de ces données propriétaires est limitée par cette licence, et elles ne sont généralement pas modifiables. Ceci est vrai pour les Géoportails propriétaires. Par exemple, depuis octobre 2011, au-dessus d'un certain seuil (25 000 requêtes journalières sur une carte standard, 2 500 sur une carte personnalisée), la diffusion des cartes de Google Maps dans des applications tierces est désormais payante. En outre, la modification du fond de cartes fourni par Google Maps est très limitée, et n'est possible que via le service de Google des cartes stylisées.

Profitant du nouvel aspect communautaire du web, ou web 2.0, les services libres tels que Wikipédia et les Géoportails collaboratifs offrent donc aux internautes une approche différente permettant de produire et de manipuler l'information librement. Les données de ces services sont entièrement produites et éditées par une communauté d'utilisateurs et sont libres de droit d'utilisation et de modification. Le plus connu des Géoportails collaboratifs et libres est OpenStreetMap (Figure 41).

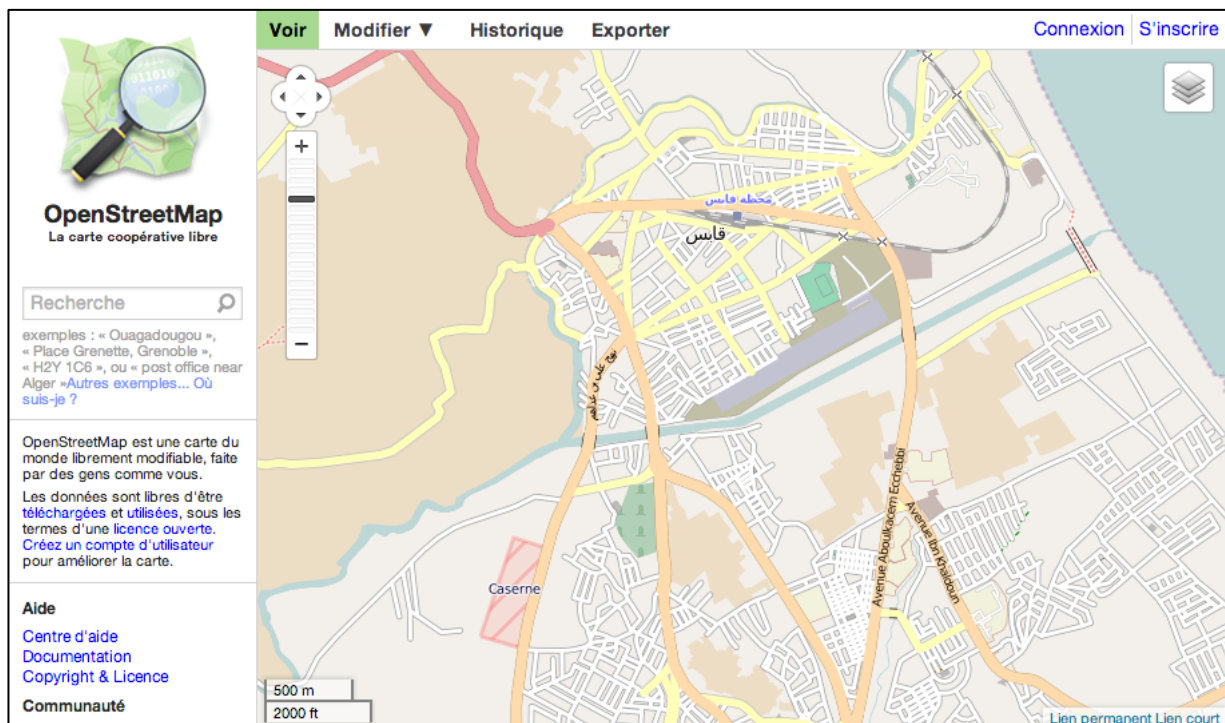


FIGURE 41 LA CARTE DE LA REGION DE GABES (TUNISIE) SUR LE SERVICE OPENSTREETMAP

2.2. MASHUP CARTOGRAPHIQUES

Les mashup, au sens large du terme, sont des outils permettant de combiner des données provenant de plusieurs sources hétérogènes. Les mashup cartographiques sont donc des interfaces, accessibles sur le web, et qui permettent d'afficher des données hétérogènes sur un fond cartographique.

L'éditeur du mashup choisit le fond de carte qu'il souhaite utiliser et y superpose, grâce aux API fournies par les éditeurs des outils, des couches de données préalablement construites et pouvant provenir de sources diverses. Les mashups cartographiques peuvent donc être définis comme un outil qui permet d'agréger du contenu à une interface cartographique fournie par un service externe.

Un très grand nombre de mashups cartographiques existe, on peut citer par exemple WIMT²⁰ « Where Is My Train » qui affiche en temps « semi-réel » les RER²¹ sur leurs lignes respectives (voir Figure 42) ; WIMT utilise l'API de Mappy et les données fournies par la RATP.

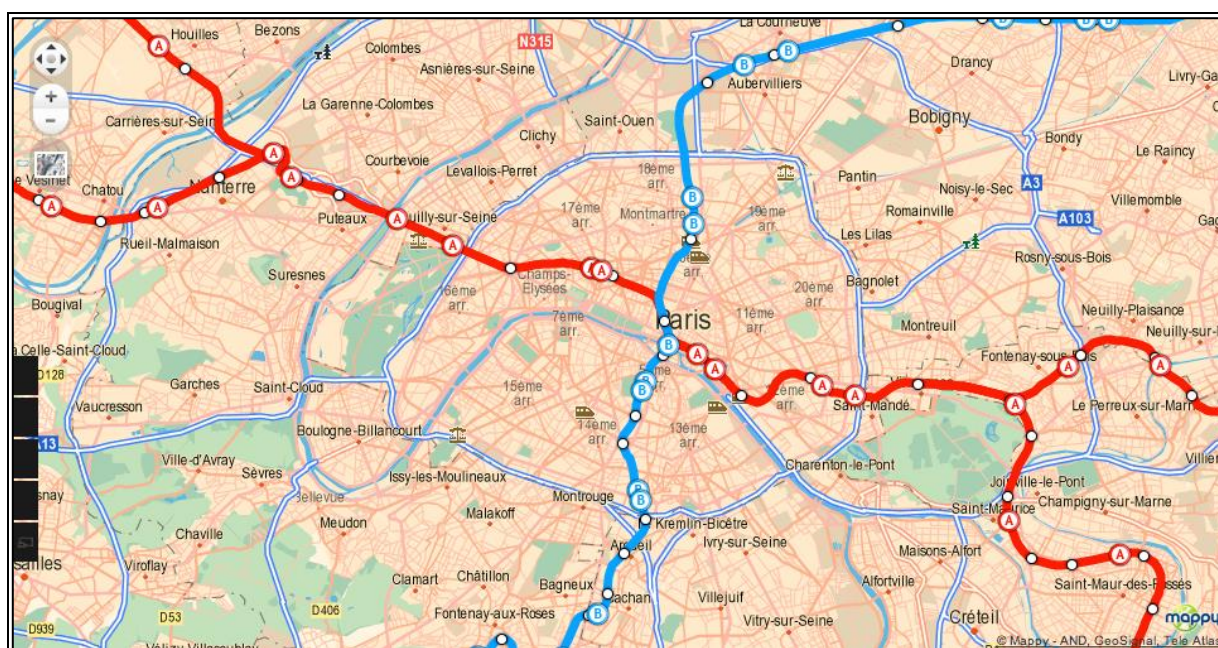


FIGURE 42 LE SERVICE « WHERE IS MY TRAIN », CHAQUE LETTRE (A OU B) REPRÉSENTE LA POSITION ACTUELLE D'UN TRAIN SELON LA GRILLE D'HORAIRE FOURNIE PAR LA RATP

Un autre exemple, Open Signal²², représente la couverture et la qualité des réseaux téléphoniques sans fils par région ; le service s'appuie sur l'API Google Maps et sur les données récoltées par l'application mobile Open Signal (Figure 43). Le service rend compte de la qualité du réseau dans lequel se trouve les utilisateurs du service, et non pas de la qualité

²⁰ <http://www.wimt.fr/>

²¹ RER est l'acronyme de : réseau express régional d'Île-de-France.

²² <http://opensignal.com/>

réelle du réseau sur le terrain. Si une région est couverte par un réseau de bonne qualité mais n'est pas fréquentée par les utilisateurs de Open Signal, alors ce dernier ne donnera pas un résultat très pertinent concernant cette région.

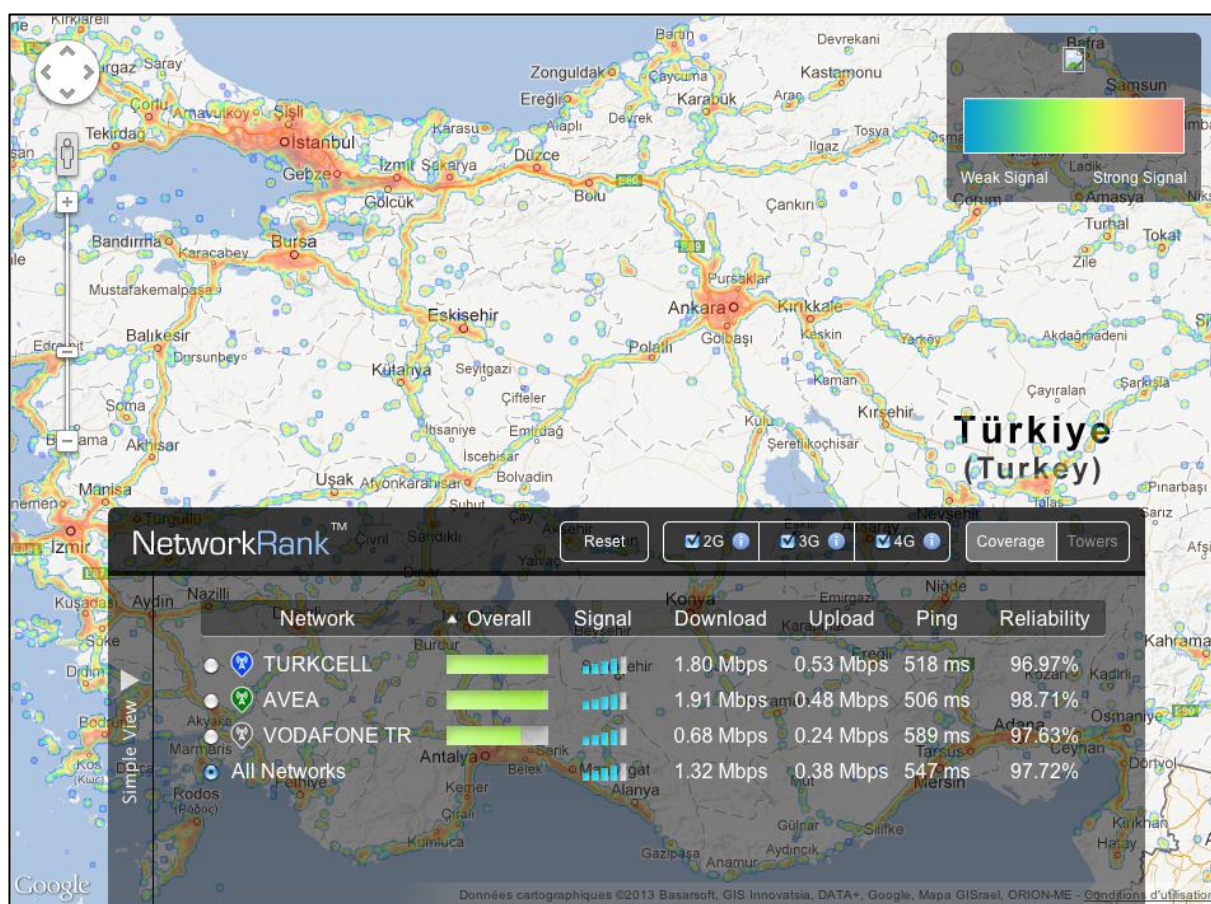


FIGURE 43 LE SERVICE OPEN SIGNAL REPRESENTANT LA QUALITE RECOLTEE DES RESEAUX TELEPHONIQUES SUR UNE PORTION DE LA TURQUIE

Une partie de ces mashups n'est pas très respectueuse des règles de base de la cartographie que nous avons présentées en chapitre A.2, ces mashups étant le plus souvent réalisés par des ingénieurs sans grande connaissance du domaine de la cartographie. Ainsi il est possible d'observer une utilisation erronée des variables visuelles, une utilisation conjointe de données qui ne sont pas mises à la même échelle ou qui n'ont pas la même granularité ni le même niveau de zoom, ainsi qu'une utilisation fréquente d'effets visuels qui ne sont pas forcément adaptés, comme les ombrages sous des marqueurs par exemple.

On peut ainsi définir deux modèles de construction de carte : le premier dit « classique » consiste en la représentation de l'information géographique par des spécialistes pour être consultable par au moins des amateurs de cartographies. Le deuxième modèle correspond à celui que l'on rencontre sur le web. La cartographie sur le web consiste en la représentation de l'information géographique ainsi que sa consultation non plus par des cartographes uniquement mais par toute personne désirant communiquer, interagir et participer au travers de cartes géographiques. Ces cartes web, qui s'adressent à tous, nécessiteraient pourtant, elles-aussi, une meilleure maîtrise des règles cartographiques pour être efficaces.

2.3. LES CARTES PRODUITES GRACE A DES APPLICATIONS DE TYPE « SOLOMO »

Les applications de type SOLOMO constituent une nouvelle tendance sur le web. Ce sont des applications qui tirent profit de trois concepts et technologies différentes : la Socialisation, la Localisation, et la Mobilité.

Socialisation : une application de type SOLOMO est une application calquée sur la notion de réseau social, c'est à dire que la production du contenu ne se fait pas de manière verticale (ce sont les webmaster qui rajoutent/suppriment/modifient les données sur le service) mais de manière horizontale (ce sont les utilisateurs du service qui le font) tout en créant des liens de différents types entre les utilisateurs (famille/amis/followers/collègues/anciens collègues/etc) et différents types d'interactions (envoi de messages, « liker », laisser un commentaire, etc)

Localisation : une application de type SOLOMO est une application qui tire parti des nouvelles technologies en matière de géolocalisation. Ainsi, un exemple d'application SOLOMO peut consister en la présentation des stations Vélib'²³ les plus proches de l'utilisateur ainsi que les places libres/occupées. Un autre exemple : les restaurants dans le quartier de l'utilisateur et les notes que ses clients leur ont données.

Mobilité : une application de type SOLOMO est une application qui s'exécute sur un téléphone mobile de type « smartphone ». La plupart des smartphones disponibles sur le marché sont équipés d'une antenne GPS permettant la localisation de l'appareil, avec plus ou moins de précision selon les marques et les types de téléphones. Ainsi une application SOLOMO s'exécutant sur un smartphone permet de générer des informations personnalisées à l'utilisateur du dit smartphone. Les stations Vélib ne s'afficheront pas seulement dans le quartier de l'utilisateur, mais aussi dans les environs actualisés en temps réel. L'application pourra par exemple présenter les restaurants les plus proches de l'utilisateur. Une autre application pourra afficher les amis de l'utilisateur qui se trouvent dans un rayon de 500 m par exemple.

L'une des principales problématiques des applications de type SOLOMO se trouve dans la taille de l'écran du téléphone mobile. En effet, la petite taille de ces écrans ne leur permet pas d'afficher correctement les mêmes interfaces que celles conçues pour les ordinateurs. Les cartographies représentées sur ces interfaces deviennent difficilement lisibles, surtout lorsqu'y sont superposées des couches de données. L'entreprise Foursquare par exemple, qui permet de réaliser des checkins dans des endroits et de voir qui sont les amis qui se trouvent à proximité, a soulevé cette problématique et tenté de la résoudre. Dans les premières versions de l'application, celle-ci affichait une carte géographique (grâce à l'API Google Maps) avec des marqueurs sur chaque endroit (enregistré dans la base de l'entreprise) à proximité de

²³ Vélib' est le système de [vélos en libre-service](#) mis en place dans [Paris](#), depuis juillet 2007, et certaines communes de la petite couronne.

l'utilisateur, ce qui conduisait à un encombrement de l'écran. Dans sa version 5 (Figure 44), Foursquare procède désormais à un affichage hiérarchisé des lieux, par classe (Shopping, Arts, Food, etc), par note (les lieux les mieux notés ont une meilleure visibilité) ou par socialisation (les lieux déjà visités par des amis sont mis en avant).

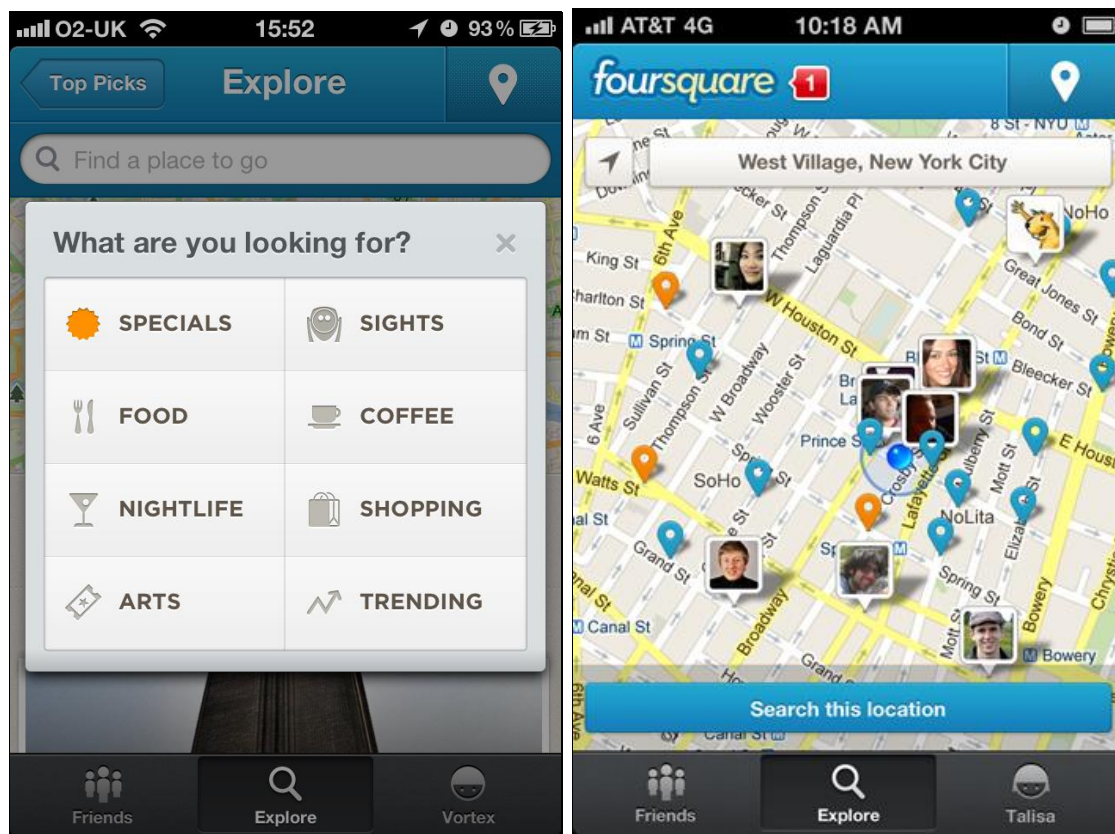


FIGURE 44 VERSION 5 DE FOURSQUARE AGREGANT LES LIEUX PAR TYPE

Les applications de type SOLOMO ne sont donc pas des applications cartographiques proprement dites, mais ce sont des applications qui tirent profit de la localisation de l'utilisateur pour lui rendre des services personnalisés. Parce que ces applications sont censées s'exécuter sur smartphone, plusieurs problématiques sont soulevées, comme la qualité de service du réseau (interruption, faible réception, etc), ou encore l'affichage de cartes géographiques sur petit écran.

2.4. ADAPTER LA CARTOGRAPHIE AUX NOUVEAUX SUPPORTS

La multiplication des supports de cartes géographiques électroniques invite les concepteurs de cartes à repenser la représentation et la manipulation des données qu'ils souhaitent distribuer sous forme cartographique. Ainsi, de nouvelles variables visuelles ont été conçues, permettant d'agir sur la transparence d'un objet, de le faire clignoter, et même de rajouter du son. Les Géoportails essayent de proposer des services qui permettent d'interagir plus facilement avec les cartes géographiques, comme modifier rapidement l'échelle, l'emprise, les couches de données représentées, et même pour certains services, la représentation graphique de ces données (transparence, couleur, etc.). Les applications mobiles quant à elles, essayent de faire

face à la problématique de la taille réduite de l'écran du smartphone. Certains constructeurs agissent directement sur le matériel en agrandissant la taille de l'écran (par exemple allant de 3.5 à 5.55 pouces) pour pouvoir y afficher plus de données. Et du côté des éditeurs d'applications, ils devront innover dans la méthode d'affichage de leurs données en supprimant par exemple ce qui est superflu quant à l'objectif de leurs applications, en agrégeant des données, en modifiant la méthode de représentation (agrandissement des objets « principaux » et rétrécissement voire suppression des autres).

Les chercheurs en information géographique, constructeurs d'appareils électroniques, éditeurs d'applications mobiles, et concepteurs de cartes géographiques, souhaitent, par l'intermédiaire de leurs améliorations de la représentation des cartes, que ces dernières soient plus facilement lisibles et donc plus efficaces. Ce qui nous amène à la question de l'efficacité des cartes.

3. EFFICACITE DES CARTES : BIEN PERCEVOIR, BIEN RECONNAITRE, BIEN ORGANISER

La lisibilité d'une carte dépend fortement de la visibilité des objets cartographiques qui y sont représentés, par conséquent, améliorer la lisibilité d'une carte nécessite l'amélioration de la visibilité des différents objets qui y sont représentés. Cette visibilité dépend de plusieurs facteurs, notamment de la conformité des règles observées pour la représentation des objets avec les règles conventionnelles de sémiologie, l'adéquation de la taille d'un objet avec l'épaisseur de sa bordure, du choix de l'ordre de superposition des couches, ainsi que du contraste des couleurs entre ces objets. La visibilité est liée au fait de bien percevoir et la lisibilité est liée au fait de bien comprendre ce qui est visible, donc de d'interpréter correctement l'information perçue. Dans la suite nous parlerons surtout de lisibilité qui englobe les deux concepts (voir et interpréter).

La compréhension d'une carte dépend également du respect, par le concepteur de cette carte, des conventions d'usage, principalement en ce qui concerne la couleur. Par exemple, il est toujours préférable d'utiliser ce que l'on appelle les *couleurs conventionnelles* qui correspondent à l'association classique et attendue entre un thème et une couleur. Ainsi, l'usage du bleu sera réservé en priorité aux thèmes de l'eau, le vert à la végétation, le rouge au danger, etc.

Dans la Figure 45 par exemple, la mer de la première carte est d'un gris légèrement bleuté très éloigné du bleu usuel que l'on trouve dans les cartes géographiques. Il en va de même pour la végétation qui est représentée en vert fluo très vif. Dans la deuxième carte, ces deux couleurs ont été modifiées, ainsi que celles du réseau routier (rouge) et des bâtiments (orange) ; cette carte est plus conforme aux représentations classiques et donc est plus rapidement comprise par les lecteurs.

Pour créer une carte lisible, Jacques Bertin définit trois facteurs de lisibilité fondés sur les limites de la perception visuelle : la densité graphique, la séparation angulaire et la séparation rétinienne. Une carte qui s'organise selon ces principes s'avère plus lisible qu'une carte qui différencie mal ses éléments graphiques et ne met pas en valeur ses éléments significatifs par rapport à l'objectif recherché. Une telle organisation des signes crée une hiérarchie visuelle de l'information qui est nécessaire pour comprendre les relations entre les signes.

Theeuwes (1992) explique que l'attention peut être captée par une discontinuité de la couleur en premier lieu, puis par une discontinuité de la forme. Un objet peut donc être saillant (il saute aux yeux) si l'œil peut le différencier de ses voisins soit par la forme, soit par la couleur, soit par les deux. A l'inverse, un objet peut difficilement être perçu s'il n'est pas différenciable de ses voisins et si sa taille est en dessous du seuil minimum visible par l'œil humain.

Cuenin (1972) définit ainsi trois types de seuils de différenciation : le seuil de perception caractérisé par la taille minimale de l'objet, le seuil de séparation caractérisé par l'écart

minimal nécessaire entre les objets, le seuil de différenciation caractérisé par les différences de tailles et de valeurs entre les objets.

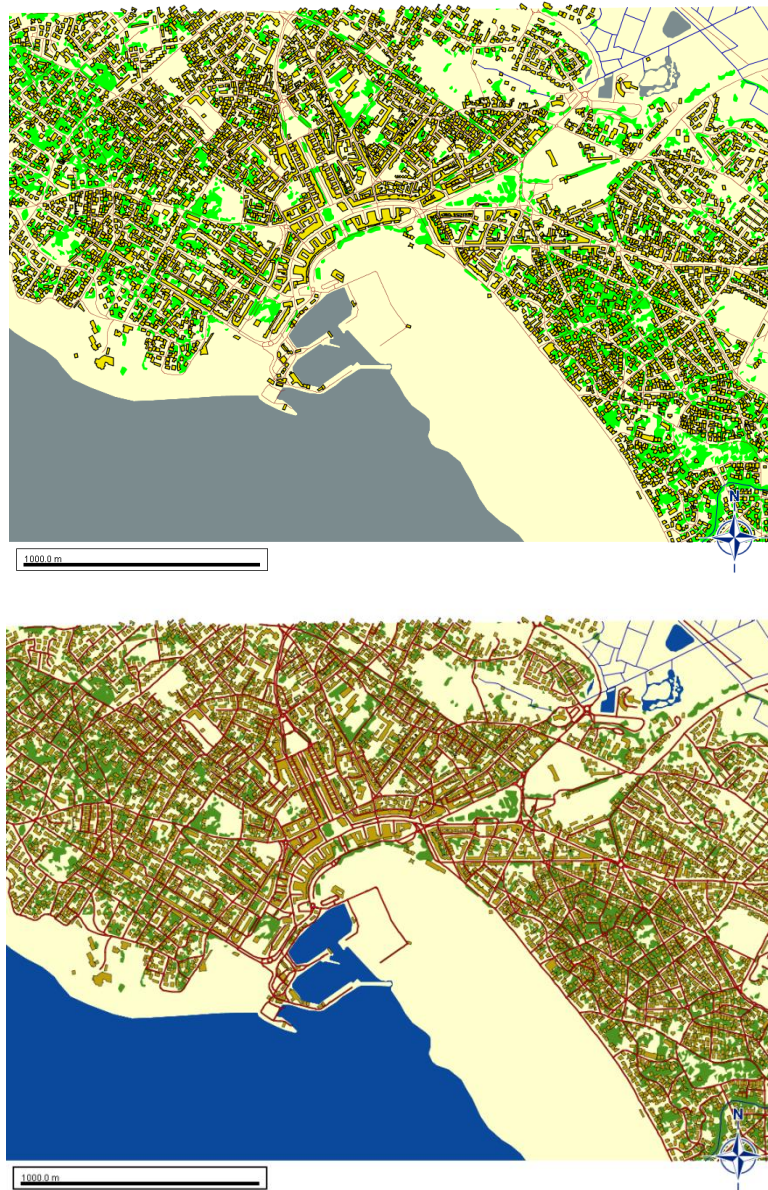


FIGURE 45 MODIFICATION DES COULEURS D'UNE CARTE POUR RESPECTER L'USAGE DE COULEURS CONVENTIONNELLES

Au-dessus de ces seuils il est possible de reconnaître et de différencier les objets ; en dessous, il n'est plus possible de reconnaître ni de différencier les objets.

Dans l'exemple suivant (Figure 46), 2 exemples pour 4 seuils différents sont présentés. Dans le premier exemple, le premier symbole est facilement reconnaissable (sur une carte) comme étant un bâtiment alors que le deuxième symbole est ambigu (est-ce un bâtiment ou une tache ?) car sa dimension est inférieure à un seuil de perception. Dans le second exemple, l'épaisseur du petit rectangle entre les deux plus grands rectangles du second symbole est indiscernable rendant le symbole tout entier ambigu (est-ce un seul objet ou deux objets

différents ?). Dans le troisième exemple, c'est la distance qui sépare les deux symboles qui est très petite et qui ne permet pas de différencier les deux symboles (est-ce un seul objet ou deux objets différents ?). Dans le quatrième exemple, la distance qui sépare les deux routes A et B à l'intersection est très petite et ne permet pas de percevoir que les deux routes ne sont pas alignées.

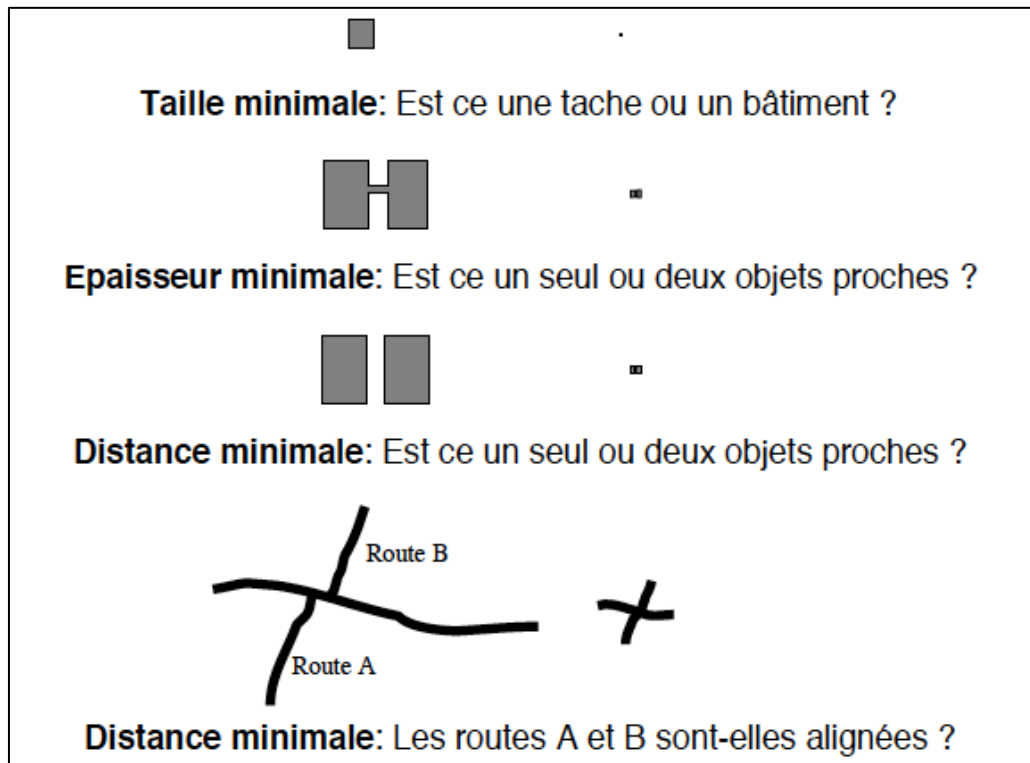


FIGURE 46 EXTRAIT D'UN COURS D'ANNE RUAS SUR LA GENERALISATION

Plusieurs recherches ont été menées pour déterminer les limites de l'œil humain et donc les seuils minimums de perception et de différenciation. Spiess (1995) a pu déterminer des valeurs en se fondant sur des expérimentations réalisées sur un écran cathodique 19 pouces avec une résolution de 1184 x 884 pixels. Les valeurs sont présentées dans la Figure 47. Spiess a également étudié les techniques de dessin des lignes inclinées sur les écrans cathodiques et comment corriger l'effet « marche d'escalier » dû aux faibles résolutions des écrans.

La Figure 47 rend compte des expérimentations menées par Spiess sur un écran dont chaque pixel mesure 0.28 mm. 0.28 mm est donc la taille minimale constatée par Spiess qui permet de repérer un point sur un fond. Pour reconnaître un carré, il faut au moins 4 pixels soit 0.56 mm de largeur, mais 3 pixels de largeur (0.84 mm) sont plus appropriés et rendent le carré mieux reconnaissable. 0.50 mm est la taille minimum nécessaire pour reconnaître un disque, 1.12 mm pour reconnaître un cercle. Pour différencier deux lignes parallèles il est nécessaire d'avoir au moins un pixel entre elles, soit 0.28 mm de distance minimale.

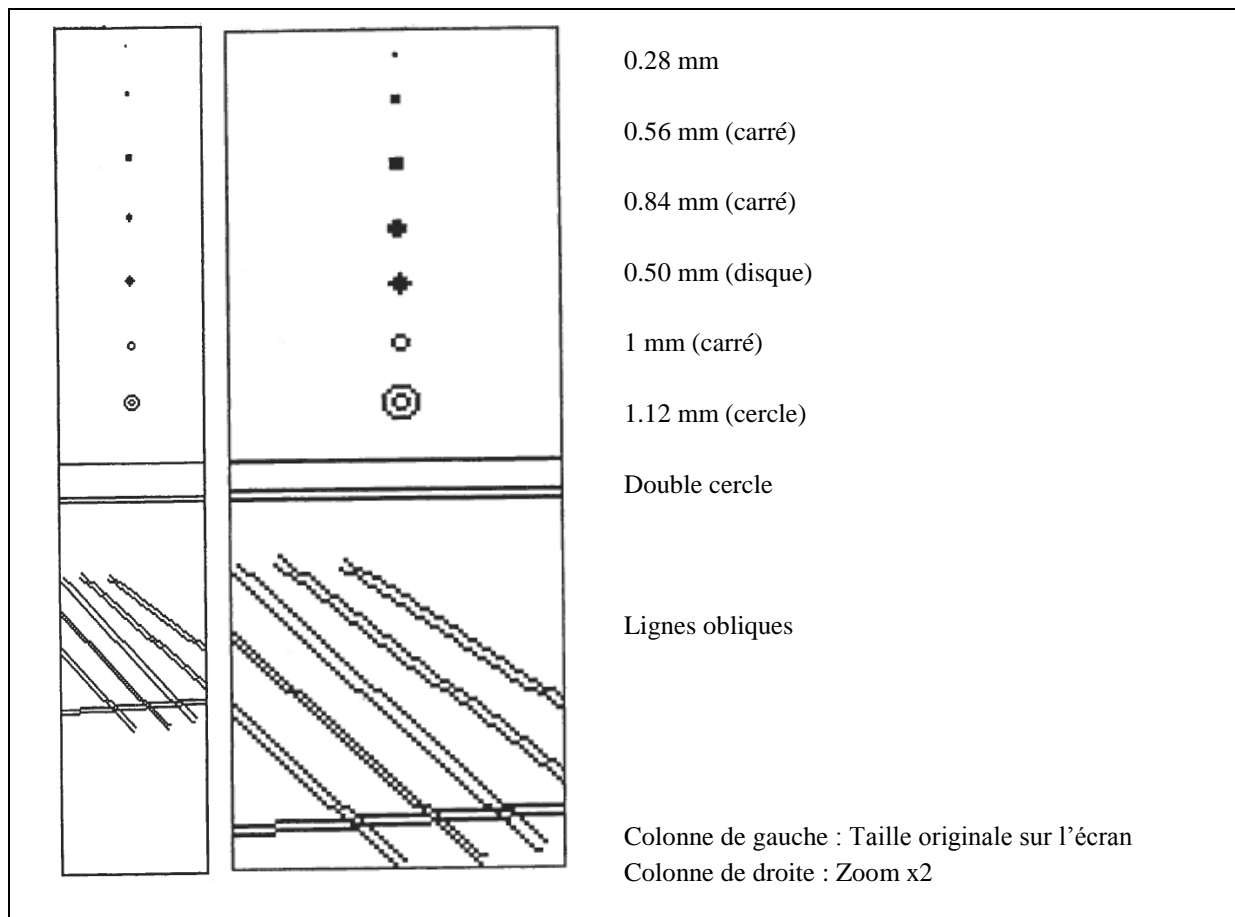


FIGURE 47 TAILLES MINIMALES DE PERCEPTION SUR UN ECRAN CATHODIQUE (SPIESS, 1995)

Weger (1999) a également étudié les limites de l'œil humain en matière de perception visuelle et les classe en 5 catégories sous les termes suivants (récapitulatif en Figure 48) :

- L'acuité visuelle de discrimination : c'est l'aptitude de l'œil à enregistrer la tache minimale perceptible. Elle correspond à l'angle α qui a pour sommet la pupille de l'œil et dont les côtés s'appuient sur les bords de la tache minimale perceptible vue à 30 cm environ. Cette tache peut varier selon le contraste et les conditions d'éclairement ;
- L'acuité visuelle d'alignement : c'est l'aptitude de l'œil à apprécier que deux traits sont dans le prolongement l'un de l'autre ;
- Le seuil de perception : c'est la dimension minimale d'un élément graphique pour en apprécier la forme. Ce seuil varie selon la forme et le contraste de l'objet ;
- Le seuil de séparation : c'est l'écart minimal nécessaire entre deux éléments graphiques voisins pour les isoler ;
- Le seuil de différenciation : c'est l'écart minimal de dimension entre deux éléments de forme identique pour exprimer deux paliers distincts.

dans l'efficacité d'une carte, il est important d'en définir des paramètres. Il apparaît qu'une carte qui suit une organisation hiérarchique sur la base du principe figure-fond devient plus lisible (Weger, 1999). En particulier, l'hétérogénéité entre les éléments facilite leur discrimination et leur classement visuel (le contraste étant une composante nécessaire à toute hétérogénéité).

La carte suivante (Figure 49) est un exemple de « mauvaise carte » dont la lecture est difficile à cause d'un grand nombre de thèmes représentés et dont la symbolisation respective n'est pas forcément compatible avec celles des autres thèmes sur la même carte. Il revient donc à l'auteur d'essayer de s'éloigner de ce genre de représentation des données géographiques.

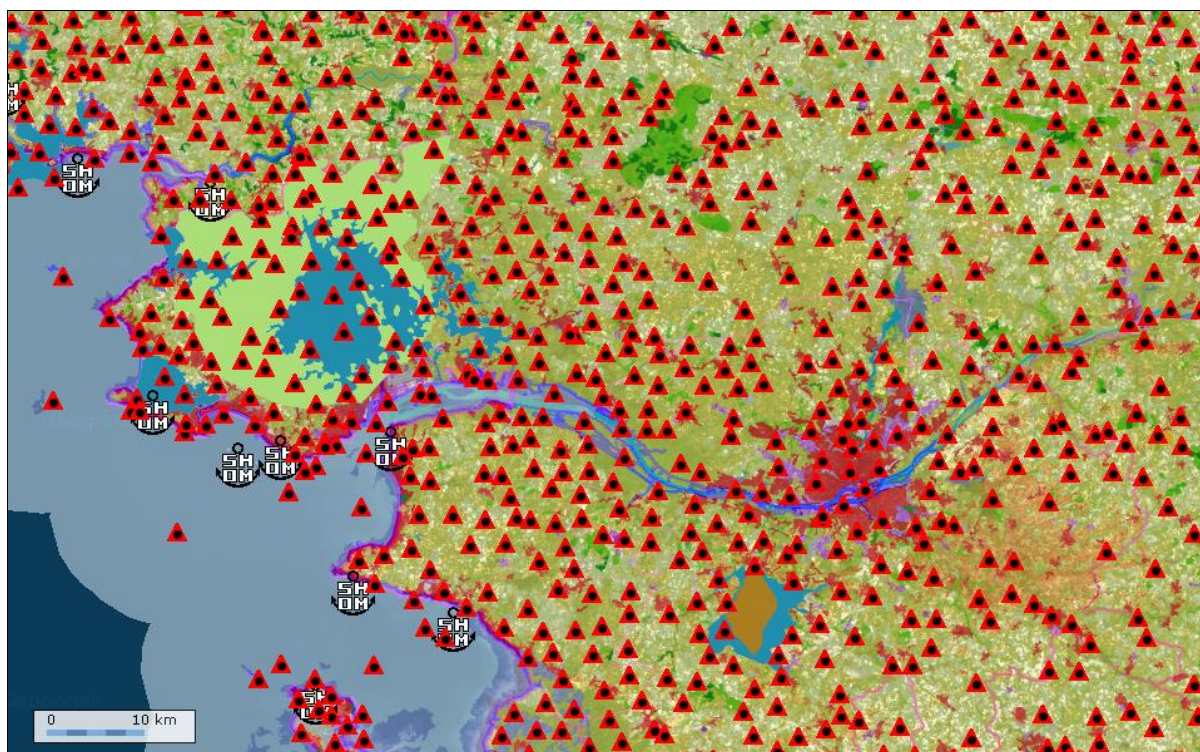


FIGURE 49 EXEMPLE DE CARTE ILLISIBLE A CAUSE D'UN TROP GRAND NOMBRE DE DONNEES REPRESENTEES

Quelques mots sur la perception et la saillance

Nous avons abordé plus haut les travaux en sémiologie graphique, généralisation, et géovisualisation. L'objectif commun de ces trois branches est de contribuer à l'amélioration de la compréhension de la carte par les lecteurs en améliorant la perception des objets de cette carte, par ses lecteurs.

La perception est définie par le CNRTL²⁴ comme « l'opération psychologique complexe par laquelle l'esprit, en organisant les données sensorielles, se forme une représentation des objets extérieurs et prend connaissance du réel. »

²⁴ Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales
<http://www.cnrtl.fr/definition/perception>

Ces objets extérieurs sont donc « ce qui est perçu par l'intermédiaire des sens ».

En cartographie, le lecteur d'une carte cherche instinctivement à organiser les objets représentés sur la carte pour parvenir à les comprendre. Il cherche les représentations qui lui évoquent des concepts familiers, comme la couleur de la mer ou de la végétation, l'alignement des blocs de bâtiments, ou encore le parallélisme et la symétrie des bordures d'une route.

Le lecteur cherche ainsi instinctivement à mettre du sens sur les signes représentés sur la carte.

En psychologie, la théorie du Gestalt, ou théorie de la forme, étudie la perception des formes en postulant que l'être humain perçoit des groupes structurés de formes. Selon les fondateurs de la théorie du Gestalt, M. Wertheimer (1880-1943) et W. Kohler (1887-1967), un ensemble de formes est différent de la somme de ces formes. Une chaise est différente visuellement de la somme de ses parties (pieds, dossier, etc.), une voiture est différente de la somme de ses parties (carrosserie, mécanique, fauteuils), etc.

Des lois qui régissent ces organisations de formes sont donc établies :

- *Loi de Proximité* : les points ou les formes les plus proches sont regroupés et perçus comme un ensemble. (Figure 50 exemple C)
- *Loi de Similarité* : les formes similaires sont regroupées et perçues comme un ensemble. (Figure 50 exemple B)
- *Loi de Clôture* : des parties manquantes peuvent être remplies par le cerveau pour percevoir un objet complet. (Figure 50 exemple D)
- *Loi du Destin commun* : des formes en mouvement avec la même trajectoire peuvent être perçues comme une seule forme. L'amas d'oiseaux est un parfait exemple ici. (Figure 50 exemple A)
- *Loi de Continuité* : des points rapprochés peuvent représenter une forme. Ils sont perçus comme un prolongement les uns aux autres.
- *Loi de Symétrie* : les formes symétriques par rapport à un point ou un axe sont perçues comme un ensemble unique, une forme à part entière.
- *Loi de Simplicité* : le cerveau a tendance à éliminer toute complexité et perçoit les objets et les groupes d'objets dans leur forme la plus simple.
- *Loi de Familiarité* : les formes les plus familières aux lecteurs sont perçues plus rapidement que les autres. (Figure 50 L'ordre des lettres)

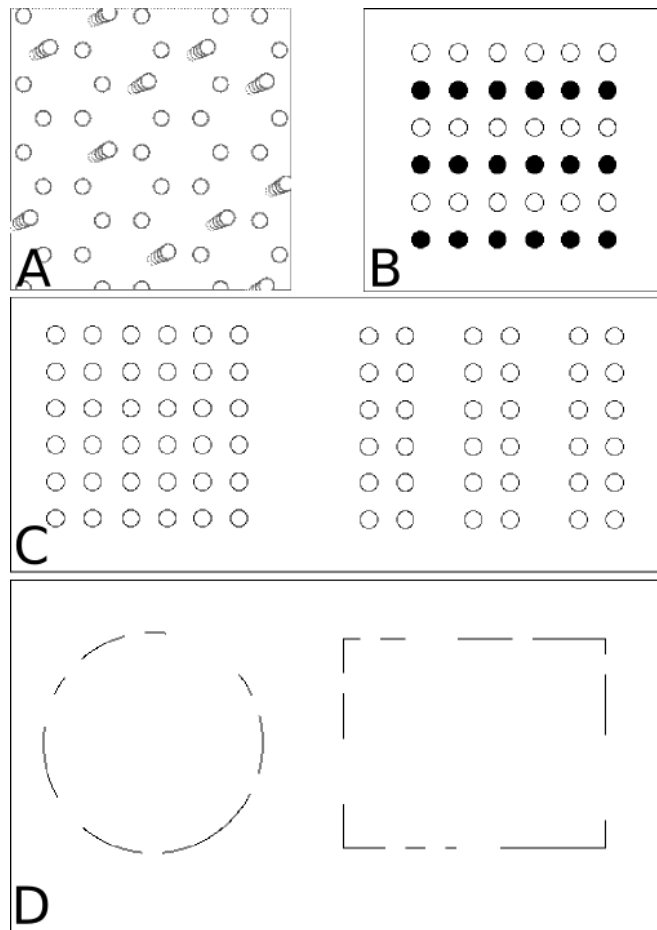


FIGURE 50 EXEMPLES DE LOIS GESTALTIENNES ²⁵

Selon une étude de l'Université de Cambridge, l'ordre des lettres dans les mots n'a pas d'importance, la seule chose importante est que la première et la dernière soit à la bonne place. Le reste peut être dans un désordre total et vous pouvez toujours lire sans problème. C'est parce que le cerveau humain ne lit pas chaque lettre elle-même, mais le mot comme un tout.

FIGURE 51 LE CERVEAU PARVIENT A REPERER ET COMPRENDRE LES MOTS MALGRE LE FAIT QUE LEURS LETTRES SOIENT MELANGEES

La théorie du Gestalt explique donc que le cerveau humain perçoit les objets comme un tout et non comme une somme d'autres objets. Ceci est également valable en cartographie où la compréhension du sens des signes n'est possible que si ces signes sont mis dans un contexte particulier avec d'autres signes particuliers. Un rectangle n'a pas de sens particulier en lui-même, mais dans un certain contexte, il peut, par exemple, symboliser un bâtiment. C'est la

²⁵ Sources Wikimedia <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gestaltningslagar6.png>
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gestalt_ley_de_semejanza.png
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gestalt_ley_de_proximidad.png
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gestalt_ley_de_cierre.png

raison pour laquelle plusieurs travaux étudient la représentation des sens en signes en vue de faciliter la compréhension des cartes géographiques par les lecteurs.

4. TRAVAUX DE RECHERCHE SUR L'AIDE A L'AMELIORATION DE CARTES

Plusieurs travaux ont été menés en vue d'améliorer l'efficacité des cartes. (Harrie et al., 2009) présentent des méthodes pour améliorer la qualité de visualisation des données cartographiques sur des Géoportails. Le problème principal, selon leur étude, est l'absence de connaissances cartographiques conséquentes dans le processus de présentation des données cartographiques. Leur recherche présente quatre types de méthodes permettant d'améliorer la lisibilité des cartes : méthodes sémantique, fusionnelle, de généralisation et de symbolisation. Le système décrit par (Harrie et al., 2009) propose à l'utilisateur de spécifier les données qu'il souhaite afficher, l'ontologie selon laquelle ces données doivent être organisées, et la symbolisation que la carte finale doit utiliser, le système pouvant faire une proposition automatique des deux derniers facteurs.

(Brewer, 2003) a proposé un outil qui aide les utilisateurs à trouver des couleurs efficaces pour des cartes choroplèthes. Les cartes choroplèthes sont des cartes statistiques qui représentent des quantités relativement à des aires géographiques²⁶. L'utilisateur peut spécifier le nombre de classes thématiques qui composent sa carte, ainsi que la relation existant entre ces classes (Figure 52) :

- Relation séquentielle : Adaptée pour la représentation de données numériques ordonnées et qui progressent d'une valeur faible vers une valeur forte.
- Relation divergente : Adaptée pour la représentation de données numériques ordonnées en mettant l'accent sur les extrêmes par rapport à une valeur moyenne (d'où l'adjectif « divergente »).
- Relation qualitative : Adaptée pour la représentation de données non numériques et qui met donc l'accent sur la relation de différenciation.

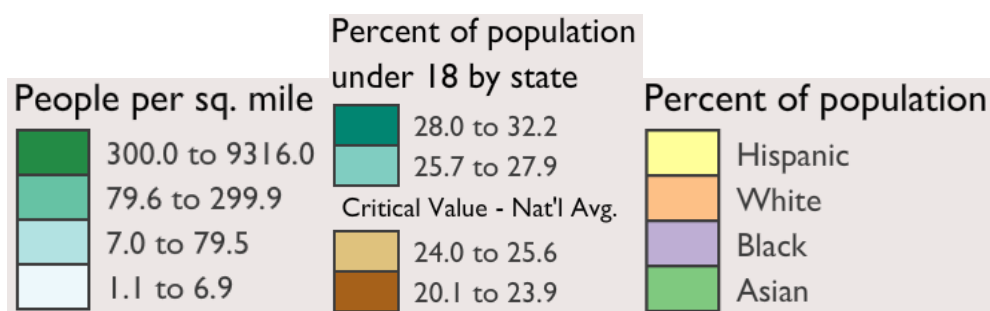


FIGURE 52 LES DIFFERENTES RELATIONS ENTRE LES CLASSES DANS L'OUTIL COLORBREWER. DE GAUCHE A DROITE : EXEMPLE DE RELATION SEQUENTIELLE, EXEMPLE DE RELATION DIVERGENTE, EXEMPLE DE RELATION QUALITATIVE

À partir de ces informations données par l'utilisateur, l'outil génère un ensemble de gammes de couleurs adaptées aux contraintes de cet utilisateur. Celui-ci peut en choisir une gamme

²⁶ http://www.hypergeo.eu/article.php?id_article=274

parmi celles proposées. L'outil donnera alors un aperçu de la gamme de couleurs choisie sur une carte définie par défaut (Figure 53).

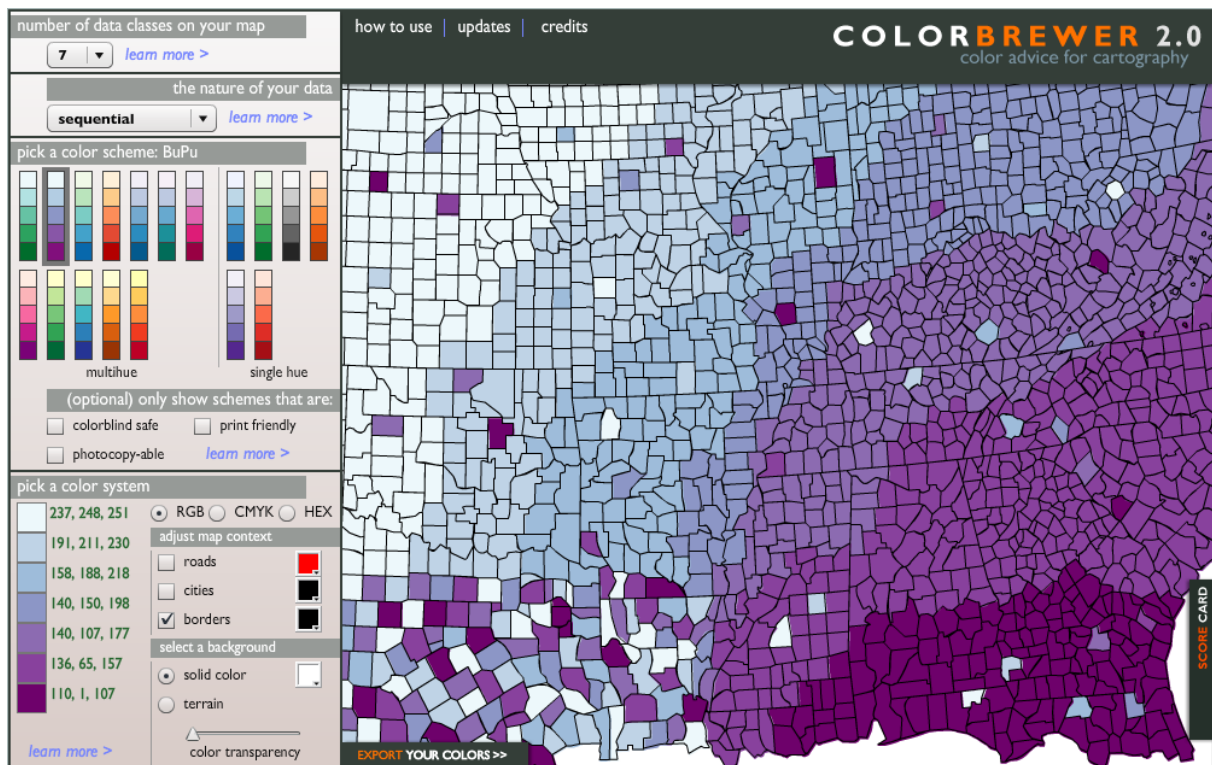


FIGURE 53 COLORBREWER 2.0. EXEMPLE AVEC 7 CLASSES ET UNE GAMME DE BLEU-VIOLET (BREWER 2003)

Bien qu'il propose de superposer des données telles que le réseau routier, le réseau hydrographique ainsi que des implantations de villes pour visualiser le résultat, cet outil est destiné aux cartes choroplèthes et non aux cartes topographiques. Il ne prend pas en compte, non plus, les cas de superposition des données surfaciques, mais seulement la répartition adjacente de celles-ci. Il est donc adapté à la cartographie d'une variable sur une partition spatiale. En outre, les gammes colorées proposées par l'outil ne sont applicables que sur une carte par défaut et pas sur des données personnalisées de l'utilisateur. Il devient alors difficile d'estimer l'adéquation des couleurs avec les besoins réels des utilisateurs.

Plusieurs recherches ont également été menées au laboratoire COGIT de l'IGN, elles proposent des modèles d'amélioration de la visualisation des cartes topographiques.

(Chesneau, 2006) a contribué à l'amélioration de la conception de légende en évaluant et en renforçant les contrastes de couleurs (teinte et valeur/clarté) dans une carte donnée. Son outil évalue les contrastes de couleurs dans une carte et vérifie s'ils décrivent correctement les relations (association, différence, ordre) entre les thèmes. Le principe de son modèle consiste en l'analyse des éventuels conflits dans une carte puis en leur correction. Le processus fonctionne ainsi par cycles (analyse et modification d'une couleur menant à l'amélioration des contrastes). A la fin d'un cycle, un nouveau cycle d'analyse est lancé jusqu'à ce que le résultat soit acceptable.

Pour pouvoir détecter et corriger les conflits, le système doit pouvoir reconnaître et identifier les couleurs dans le but de pouvoir les comparer. Pour cela, Chesneau, en utilisant les travaux d'Itten et de Brewer concernant la couleur, a intégré deux volets dans son modèle : une palette de couleurs, et une théorie sur les contrastes de couleurs.

Chesneau a donc défini trois cercles chromatiques : couleurs pures, couleurs grisées, gris colorés (Figure 54). Ces trois cercles seront utilisés dans le processus de sélection des couleurs pour mesurer les contrastes perçus entre elles. Les critères de choix des couleurs composant les cercles sont les suivants : elles doivent être adaptées à la cartographie du risque, elles doivent être perçues de manière équivalente qu'elles soient représentées sur papier ou sur écran, et elles doivent pouvoir être identifiables de façon unique pour pouvoir être comparées entre elles. Ces trois cercles (plus 9 niveaux de gris), composés au total de 163 couleurs, peuvent donc être considérés comme une table de référence ou une palette de couleurs (du point de vue de la peinture) adaptées et pouvant être utilisées en cartographie du risque, qui est le domaine étudié par Chesneau (Thèse II.1).

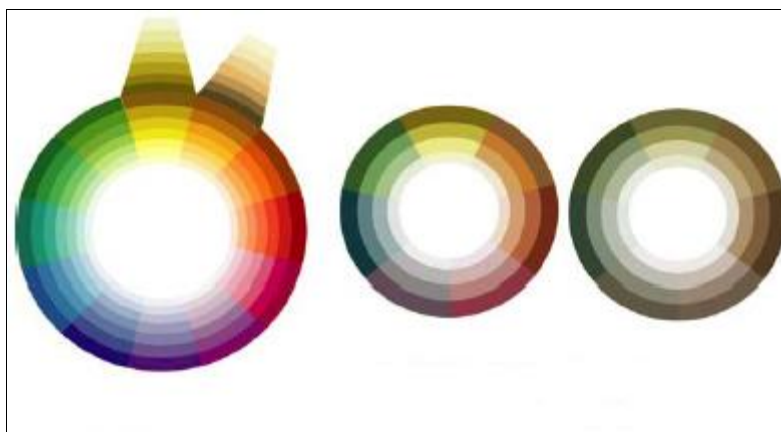


FIGURE 54 COULEURS DE LA TABLE DE REFERENCE PROPOSEE PAR CHESNEAU (2006)

En s'inspirant des travaux d'Itten, Chesneau a établi trois objectifs pour parvenir à améliorer les cartes : pouvoir évaluer, numériquement, les contrastes de couleurs ; pouvoir les interpréter ; être capable de réaliser des nouvelles propositions.

L'évaluation des contrastes se fonde sur le calcul de la distance entre deux couleurs sur les cercles chromatiques pour obtenir une valeur $[\lambda]$ allant de 0 (pas de contraste) à 5 (contraste maximal). Cette valeur étant une valeur absolue, elle ne donne pas de renseignement sur la qualité du contraste d'un point de vue sémantique. Vient alors l'interprétation de cette valeur selon le contexte. Ainsi, lorsque deux thèmes ont une relation d'association leur contraste de teinte ($[\theta]$) ne doit pas être fort, à l'inverse de la relation de différenciation. Dans le cas des relations d'ordre, le contraste de teinte doit être nul au profit d'un contraste de clarté ($[Z]$) plus fort (Figure 55).

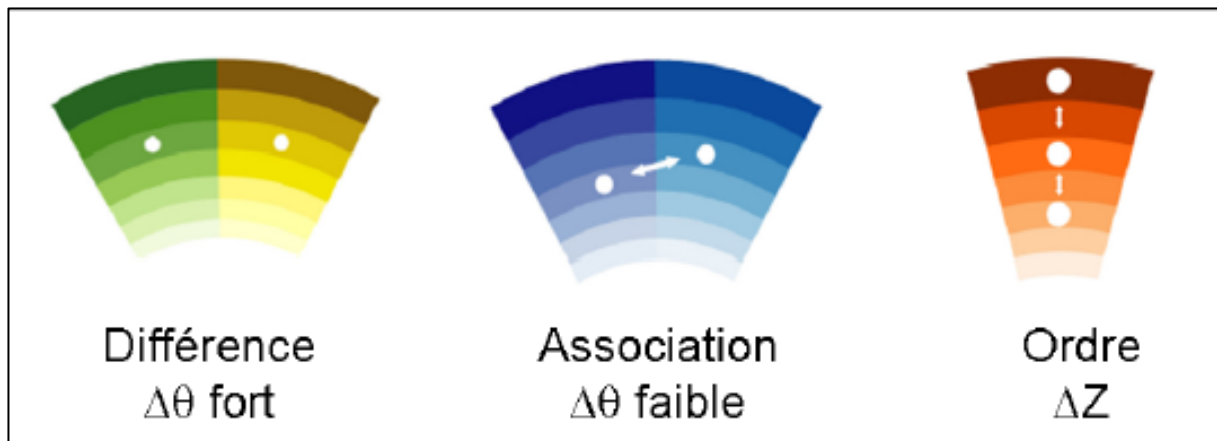


FIGURE 55 CONTRASTES SELON LES RELATIONS SEMANTIQUES ENTRE LES THEMES. (CHRISTOPHE, 2009) D'APRES (CHESNEAU 2006)

Après avoir évalué et interprété les contrastes entre les différents thèmes représentés sur la carte, le modèle de Chesneau permet de modifier les couleurs des objets qui ont un mauvais contraste avec leurs voisins tout en respectant les couleurs conventionnelles (bleu pour l'eau, vert pour la végétation, etc).

A l'inverse de Chesneau qui effectue ses analyses et modifications en tenant compte des voisinages des objets sur la carte, (Buard et al., 2009) proposent d'analyser les contrastes colorés entre chaque couple de ligne de légende sans tenir compte justement du positionnement des symboles associés à ces lignes de légendes sur la carte. Le but est alors de résoudre les problèmes éventuels des couleurs de la légende sur les cercles chromatiques. Ainsi, deux règles ont été posées par (Buard et al. 2009) : la couleur d'une ligne de légende doit être cohérente avec la famille de couleurs du thème dont fait partie cette ligne de légende ; les relations entre deux couleurs doivent être en concordance avec les relations sémantiques des lignes de légendes associées à ces couleurs (relations d'association, d'ordre ou de différence).

D'autre part, les cercles chromatiques utilisés dans ce modèle sont des cercles améliorés pour mieux traduire les distances perçues (Buard et al. 2007). En effet, (Buard et al. 2007) ont démontré, suite à des tests, que les écarts mesurés entre les couleurs sur les cercles ne sont pas homogènes avec les écarts perçus. Pour cela, (Buard et al 2007) ont réalisé (Figure 56) un repositionnement des secteurs de couleurs selon les distances réellement perçues de teinte (cercle 1) et de clarté (cercle 2).

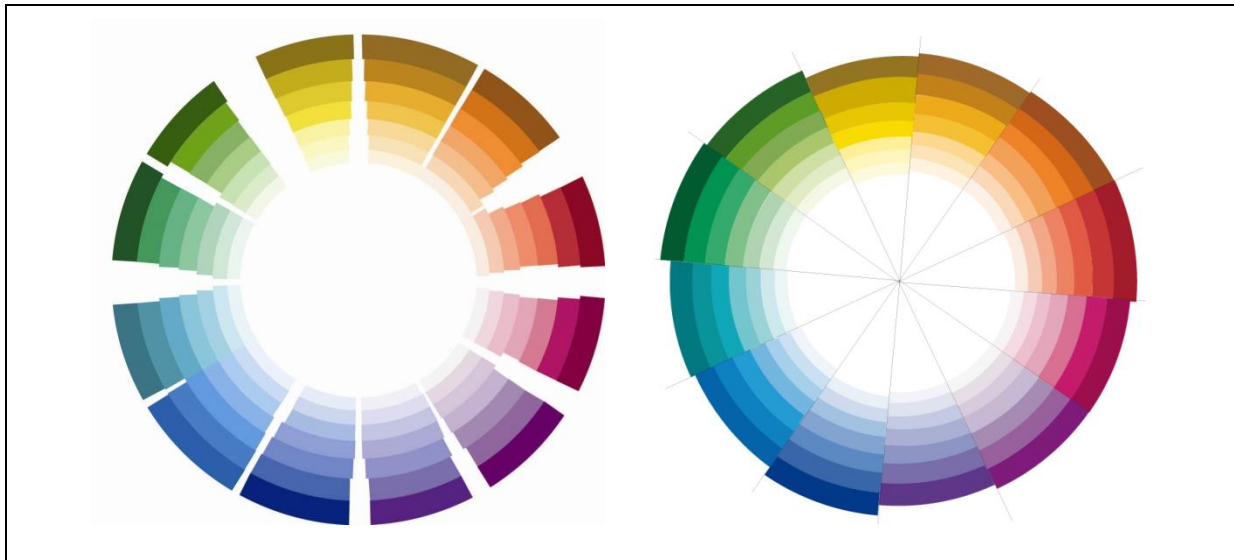


FIGURE 56 REPOSITIONNEMENT DES SECTEURS DE COULEURS DU CERCLE CHROMATIQUE PRINCIPAL SELON LES DISTANCES PERÇUES DE TEINTE ET DE VALEUR

Ainsi le modèle de (Chesneau, 2006) complété par les travaux de (Buard et al. 2009) améliorent la carte et les contrastes de couleurs selon des règles et des théories établies mais ne prennent pas en considération les préférences des utilisateurs.

Cette problématique est étudiée par (Christophe, 2009) qui a contribué à la fabrication de légendes en proposant un modèle de conception coopérative de légende : il s'agit d'aider l'utilisateur à construire des légendes correctes, d'un point de vue cartographique, soit à partir d'échantillons de couleurs qu'il spécifie lui-même, soit en lui proposant d'exprimer ses goûts à partir d'une palette de couleurs extraites de tableaux célèbres (les toiles de maîtres). Pour le second cas, la palette extraite du tableau sera appliquée sur la carte de l'utilisateur après d'éventuelles retouches (voir Figure 57). Son modèle poursuit la formalisation de règles de cartographies conventionnelles et de règles de cartographie élémentaires (deux thèmes différents ont des teintes différentes), et prend en compte les préférences des utilisateurs. Ainsi, son modèle opère en 4 étapes :

- L'utilisateur choisit une source d'inspiration (échantillons de cartes ou toiles de peintures),
- L'utilisateur indique ses préférences sur les sources d'inspirations précédemment choisies,
- Le système interprète ces préférences pour construire des légendes adaptées,
- L'utilisateur choisit une légende parmi l'ensemble des solutions proposées et réalise des retouches si la légende ne lui convient pas complètement.

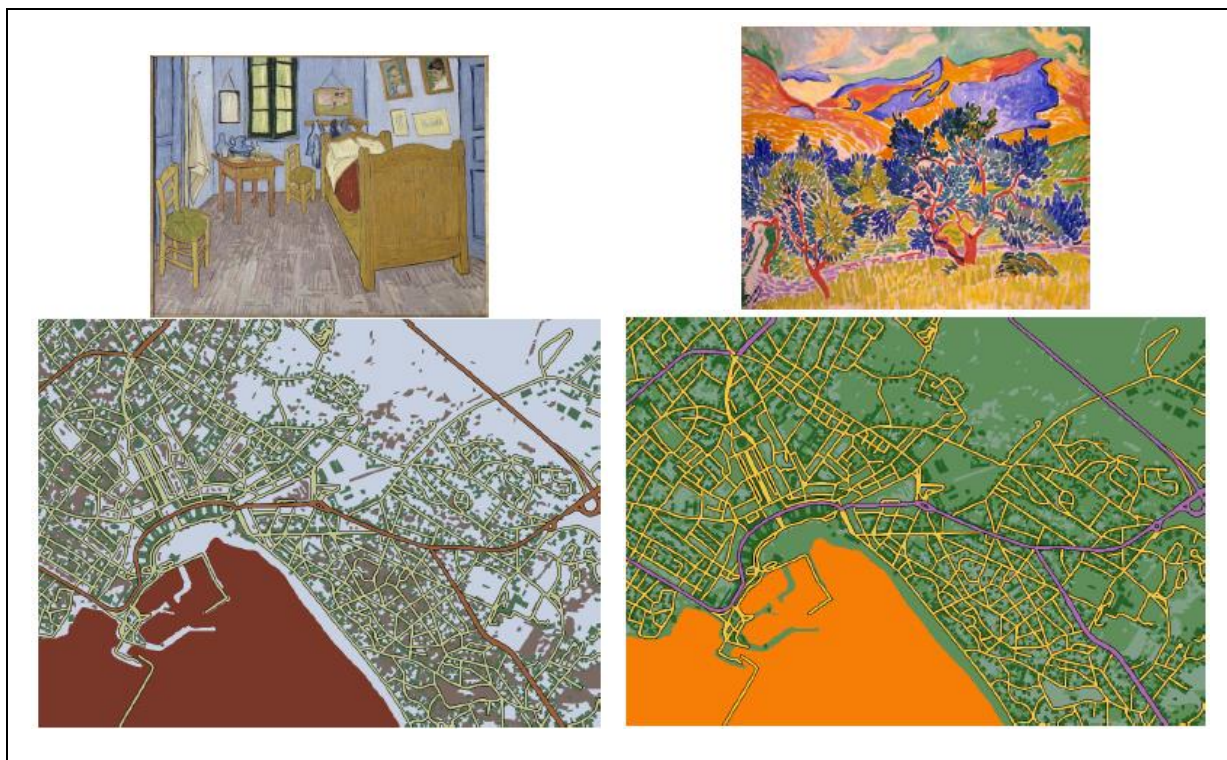


FIGURE 57 CARTES PROPOSEES PAR LE MODELE DE (CHRISTOPHE 2009) EN S'INSPIRANT D'UNE PALETTE DE VAN GOGH A GAUCHE ET D'UNE PALETTE DE DERAINE A DROITE

(Jolivet, 2009) propose une application reposant sur des services web traduisant les étapes de réalisation d'une carte. Son modèle interroge l'utilisateur à l'aide d'un formulaire (Figure 58), sur le contexte sémantique de la carte (carte touristique, carte de risque, etc.), ainsi que sur les spécifications de la zone géographique, l'échelle, et les thèmes à représenter (hydrographie, reliefs, bâtiments, etc.). L'outil propose alors une légende respectant l'ontologie Ontocarto (Domingues et al., 2009) qui décrit les besoins spécifiques pour la modélisation et l'interrogation de l'information géographique. Cette légende peut être affinée par l'utilisateur en exprimant ses préférences concernant les couleurs des symboles. L'outil génère finalement la carte en utilisant les connaissances récoltées et l'affiche conjointement avec la légende réalisée.

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans la continuité des travaux menés au sein du COGIT pour aboutir à terme à de meilleurs modèles de construction de cartes personnalisées par les lecteurs de cartes eux-mêmes.

Définition des spécifications
Spécification de la carte – étape 1

- zone géographique : Isère

- échelle : 1 : 25.000

- profil lecteur : adulte

- type de carte : topographique

- thématiques

- hydrographie : fond de carte
- occupation du sol : fond de carte, nature ☒
- relief : fond de carte ☒
- infrastructures de transport : fond de carte ☒
- bâti : fond de carte ☒
- limites : fond de carte ☒

autres domaines ?

Send

FIGURE 58 FORMULAIRE QUI INTERROGE L'UTILISATEUR SUR SES PREFERENCES POUR GENERER UNE CARTE ET UNE LEGENDE ADAPTEE D'APRES LES TRAVAUX DE (JOLIVET 2009)

5. POSITIONNEMENT

La section précédente a montré qu'il existait des théories cartographiques permettant de réaliser des cartes efficaces. Notre travail se positionne dans ce contexte, à savoir l'aide aux utilisateurs novices pour construire des cartes géographiques correctes (sémiologiquement) et efficaces. Pour cela, nous relevons dans un premier temps les limites et les problématiques rencontrées lors de la création de cartes sur ordinateur. Puis, dans un deuxième temps nous exposons notre proposition et les étapes nécessaires pour parvenir à réaliser une carte efficace. Les propositions seront développées au chapitre B.

5.1. LIMITES ET PROBLEMATIQUES

Les nouvelles possibilités de création et de manipulation des informations géographiques font émerger des besoins croissants dans plusieurs étapes, de la numérisation de ces informations géographiques et leur stockage, jusqu'à leur représentation sous forme graphique.

Ainsi, la séparation entre les données et leur représentation, couplée à la liberté de l'utilisateur de construire sa carte, engendre souvent des erreurs d'ordre sémiologique et conventionnel telles que : le mauvais choix de styles pour un certain type d'objets, le faible contraste entre des signes voisins, le recouvrement de signes par d'autres signes opaques, l'utilisation de couches de données avec un niveau de détail différent pour chacune. Ces erreurs sont d'autant plus fréquentes en absence d'un cartographe traditionnel dont la tâche est d'optimiser la représentation des données cartographiques (Harrie et al., 2009). Afin d'accroître la lisibilité des cartes, des méthodes automatiques doivent être utilisées. A titre d'exemple, les outils actuels comme le Géoportail²⁷ permettent à l'utilisateur de construire une carte, mais ne proposent pas encore de méthodes d'analyses, d'application des règles sémiologiques et conventionnelles ni d'outils de corrections pour optimiser la visualisation de ces cartes.

Hétérogénéité des sources

Un des avantages des nouveaux outils qui facilitent à l'utilisateur la construction d'une cartographie personnalisée est la possibilité d'y représenter des données pouvant provenir de sources différentes. Ainsi, il est possible pour un utilisateur de choisir un fond de carte issu de « Google Maps », d'y superposer une couche de prévision des marées du SHOM, la couche des communes administratives de l'IGN, ainsi qu'une couche de POI (Points Of Interest) issue du projet « Open Street Maps ». Cette fonctionnalité pratique peut engendrer des problèmes, tels que la mauvaise représentation des données si celles-ci sont disponibles avec des niveaux de détails différents, ainsi que des décalages dans la représentation de ces données surtout si les différentes sources n'utilisent pas les mêmes niveaux de généralisation, ce qui est souvent le cas. Le cas des projections différentes est plus rare qu'auparavant notamment avec l'utilisation grandissante du système officiel Lambert93 sur le territoire français.

²⁷. Géoportail : <http://www.geoportail.fr/>

Superposition et opacité

La co-représentation de couches de données sur une carte peut engendrer des problèmes d’affichage. Ainsi, selon l’ordre d’affichage des couches, il est possible que des objets opaques (non transparents) de grandes surfaces recouvrent d’autres objets de plus petite surface; ces derniers seront donc invisibles ou peu visibles au lecteur, menant à un manque d’information et donc à des erreurs d’interprétation et de compréhension. Une autre erreur de représentation peut consister en le non-respect de l’ordre conventionnel de représentation des couches de données. Ainsi, un utilisateur peut représenter la couche de l’hydrographie (fleuves, rivières, lacs, etc.) au-dessus de la couche de données routières, ce qui peut occasionner une gêne lors de la lecture de la carte, notamment pour des lecteurs avertis et habitués aux cartographies (et utilisant le réseau routier).

Ainsi, dans la Figure 59, l’ajout de la couche correspondant aux risques de crue du bassin de la Seine recouvre une grande partie des bâtiments et des routes, mais si cette couche était affichée sous les autres, les problèmes d’inondations seraient masqués ; une solution pourrait être, par exemple, d’utiliser des transparences pour voir l’inondation et ce qu’elle recouvre (Figure 59 et Figure 60).

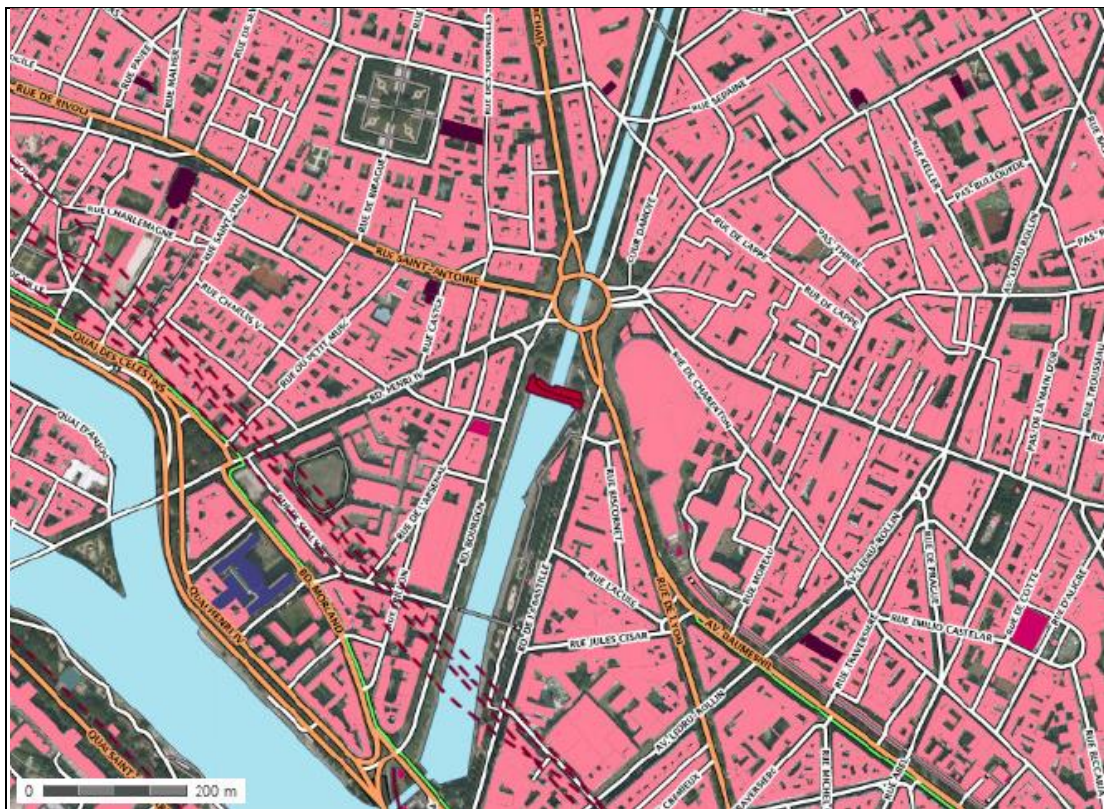


FIGURE 59 UN QUARTIER DE PARIS SUR LEQUEL SONT REPRESENTES LE RESEAU ROUTIER, LE RESEAU FERROVIAIRE, LES BATIMENTS, ET L’HYDROGRAPHIE



FIGURE 60 LE MEME QUARTIER DE PARIS SUR LEQUEL ONT ETE RAJOUTES LES RISQUES DE LA CRUE DU BASSIN DE LA SEINE

Contrastes de couleurs entre objets voisins

Après le choix des données à représenter et le choix de l'ordre d'affichage des couches, vient celui des couleurs à attribuer aux différents thèmes de la cartographie. Des problèmes de représentation apparaissent lorsque l'utilisateur choisit des couleurs proches sur le cercle chromatique pour des thèmes ayant des objets voisins sur la carte. Ainsi le contraste des couleurs est faible, la difficulté de la différenciation des objets est élevée d'où une reconnaissance difficile voire erronée de ces objets (voir Figure 61).



FIGURE 61 LA PROXIMITÉ DES COULEURS DES BATIMENTS ET DE LA VEGETATION REND LEUR DISTINCTION DIFFICILE

Couleurs « désagréables »

Un autre problème qu'entraîne un mauvais choix des couleurs est celui des couleurs dites désagréables. L'utilisateur voulant mettre en relief un certain aspect de la carte, ou tout simplement voulant rendre la carte plus « jolie », peut utiliser des couleurs « vives », « sombres » ou « grisées » pour atteindre son objectif. Cependant des tests (Chapitre B.5) prouvent que dépasser un certain seuil dans le ratio entre les surfaces de ces couleurs et la surface totale de la carte devient gênant pour la lecture de cette carte.

Objets de petites tailles

Lorsque l'utilisateur construit une carte et choisit un niveau de zoom différent que celui pour lequel les données ont été créées il peut y avoir des problèmes de représentation et donc de lecture de la carte. Ainsi, des objets peuvent être représentés à une échelle différente de celle pour laquelle ils ont été généralisés et peuvent donc avoir une taille trop petite empêchant leur reconnaissance et leur différenciation par les utilisateurs. Cette situation conduit donc à des erreurs de compréhension lors de la lecture de la carte.

Epaisseurs des bordures

Les problèmes de lecture et de différenciation des objets peuvent aussi survenir lorsque le constructeur de la carte choisit de représenter des objets en leur attribuant une bordure inappropriée à leur taille. Ainsi, un objet de petite taille peut voir sa surface presque totalement recouverte par sa bordure d'où une difficulté lors de la lecture de cet objet et la reconnaissance de son appartenance à tel ou tel thème.

La présence de bordure peut également avoir des effets sur l'aspect global de la carte notamment sur les couleurs, comme le montre la figure (Figure 62) où le simple ajout de la bordure sur les bâtiments produit une carte beaucoup plus foncée que celle obtenue sans bordure sur les mêmes bâtiments. Cette surcharge visuelle en symboles et en couleurs peut gêner la lecture de cette carte.

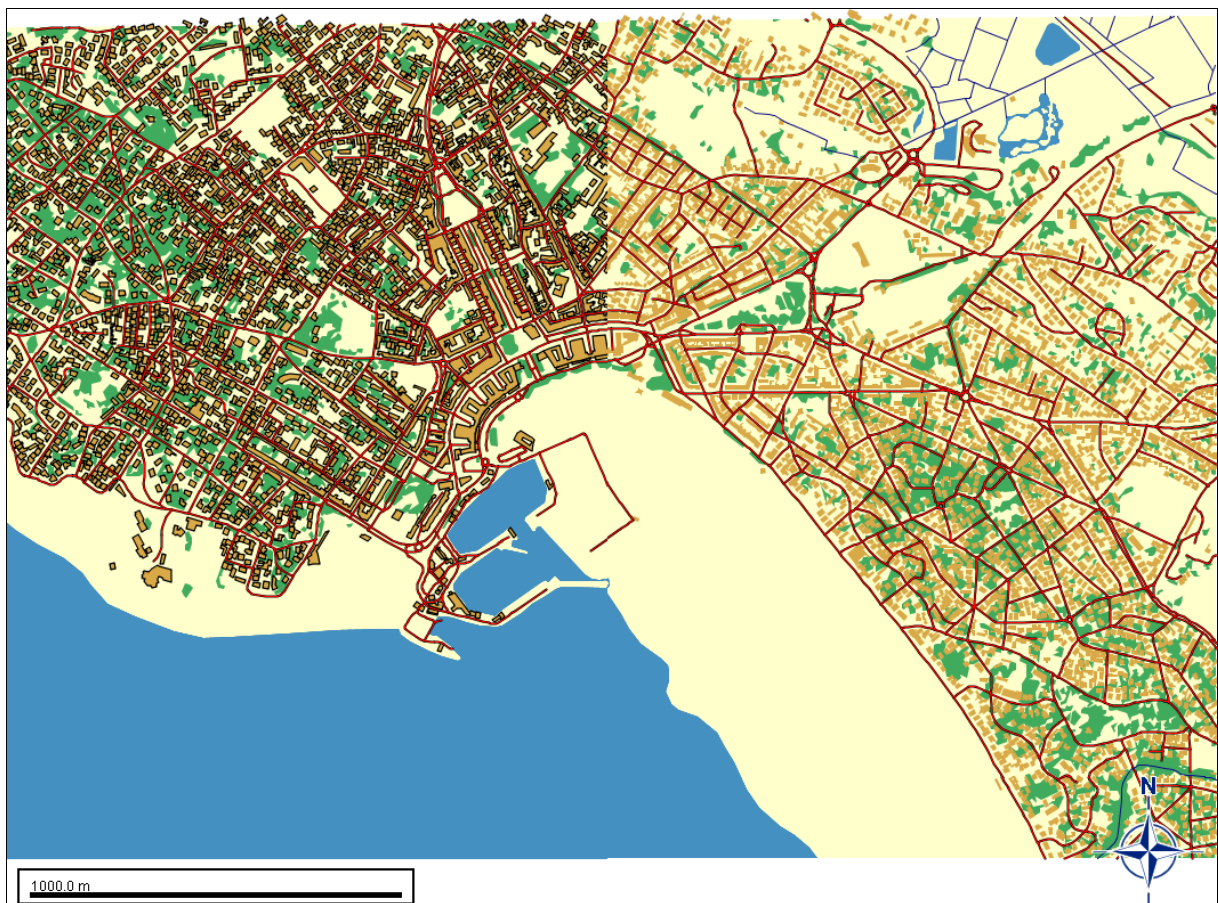


FIGURE 62 LA MEME EMPRISE D'UNE REGION AVEC A DROITE UNE REPRESENTATION DES BATIMENTS SANS AUCUNE BORDURE ET A GAUCHE AVEC AJOUT DE BORDURE

Conventions de symbolisation

Les concepteurs de cartes sur internet sont généralement des utilisateurs non-experts en cartographie ; ils ne connaissent pas une grande partie des règles sémiologiques et des règles conventionnelles de représentation des données sur une carte. Ce manque de connaissance peut les mener à réaliser des cartes ne respectant pas ces règles, rendant ainsi leur lecture par d'autres personnes difficile voire impossible. Les règles conventionnelles les plus généralement violées sont celles du choix des couleurs et celles de l'ordre d'affichage des

couches. Par exemple, il est connu que la mer doit être représentée sur les cartes en une nuance de bleu et la végétation en une nuance de vert, même si la couleur de la mer est rarement bleue et que la végétation peut avoir de multiples teintes. Intervertir ou modifier ces couleurs mènent à la confusion des lecteurs lors du déchiffrement de la carte. Une autre règle s'intéresse à la représentation des routes. Il est courant que la couche des routes soit affichée au-dessus des autres couches ; les recouvrir par d'autres données comme l'hydrographie peut également mener à un inconfort lors de la lecture de la carte.

5.2. PROPOSITION

L'existence d'erreurs de représentation lors de la création de cartes par des novices peut engendrer des problèmes de compréhension de cette carte.

Ce constat motive notre recherche qui concerne l'amélioration des cartes créées sur le web. Nous voulons concevoir un système d'aide à l'amélioration de cartes qui devra pouvoir analyser les cartes et les reconstruire en respectant au mieux les règles de sémiologie dans le but de rendre les cartes le plus compréhensible possible.

Le processus d'amélioration de la carte sera conduit en quatre étapes : (1) évaluation de la visibilité des objets cartographiques, (2) diagnostic de la visibilité globale des objets de la carte, (3) proposition de modifications, et finalement (4) intervention sur la carte en agissant sur les symbolisations.

L'évaluation de la visibilité des objets cartographiques (étape 1) est fondée sur un système d'indices de visibilité qui caractérisent chacun un aspect visuel de la carte.

L'étape de diagnostic (2) devra, à partir des valeurs de ces indices, détecter les problèmes de représentations qui mènent à une mauvaise lisibilité globale de la carte.

Suite à ce diagnostic, le système proposera (étape 3) des améliorations et des modifications à apporter à la carte en fonction de la valeur de ces mêmes indices, afin d'aboutir à une carte de meilleure qualité visuelle.

L'intervention sur la carte (4) consiste en la modification des symbolisations des objets cartographiques pour optimiser la visibilité des objets cartographiques représentés sur la carte et pour ainsi aboutir à une carte plus correcte et mieux compréhensible. L'amélioration d'une symbolisation doit se traduire par une amélioration de la valeur des indices concernés.

Ces quatre étapes seront réitérées dans le processus (voir Figure 63) jusqu'à avoir des valeurs d'indices satisfaisantes.

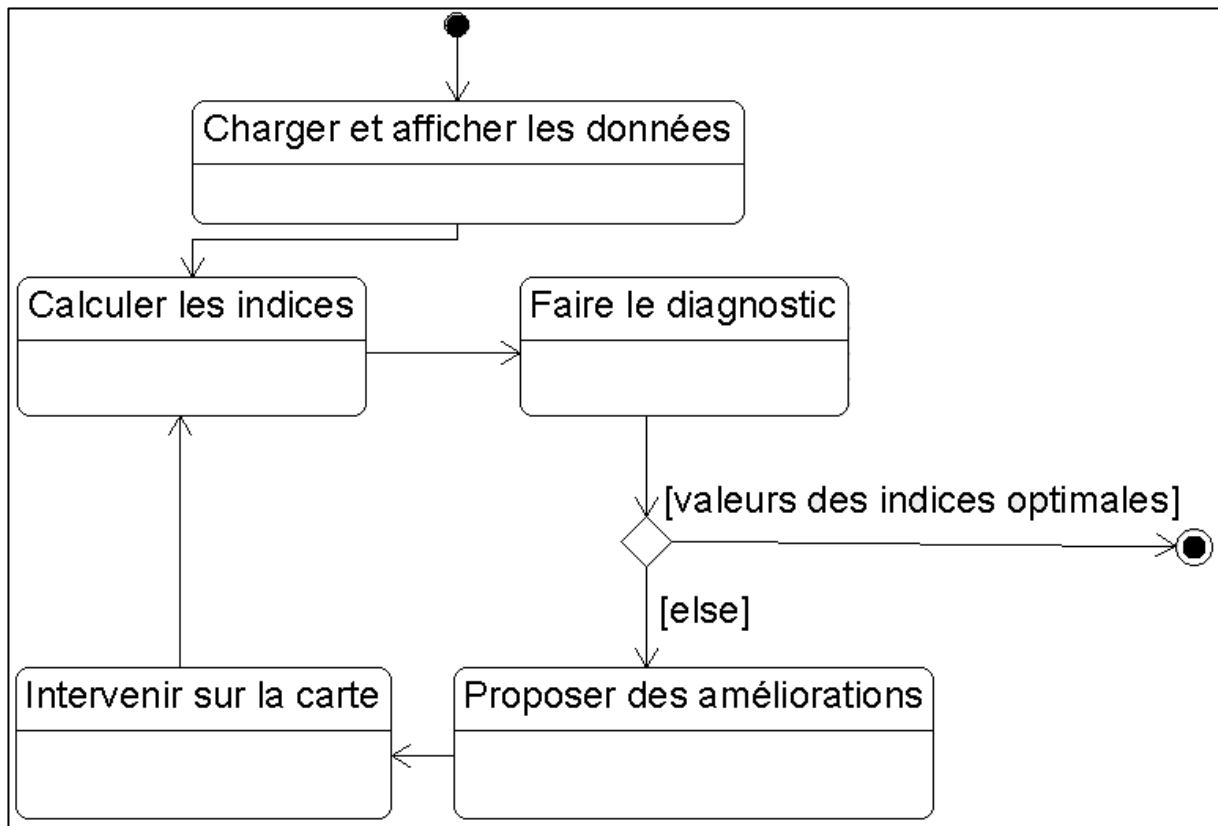


FIGURE 63 DIAGRAMME D'ETAT-TRANSITION DU PROCESSUS D'AMELIORATION DE LA CARTE

PARTIE B - PROPOSITION

1. APPROCHE ET PRESENTATION DU MODELE

Afin améliorer la lisibilité d'une carte géographique, un modèle de traitements a été conçu durant cette thèse. Ce modèle a pour objectifs : 1) d'évaluer la visibilité des symboles présents sur cette carte ; 2) de décider quelles modifications devront lui être apportées pour optimiser la visibilité de ses symboles. Nous rappelons (chapitre A) que nous souhaitons améliorer la *lisibilité* de la carte en travaillant sur la *visibilité* des objets.

Ce modèle fonctionne selon une approche itérative semi-automatique.

Dans un premier temps, un ensemble de cinq indices a été défini. Ces indices permettront, chacun, d'évaluer la visibilité d'un aspect en particulier de la carte et attribuer une note allant de 1 à 10 à chacun de ces aspects. Ces cinq indices seront les suivants : indice de superposition, indice de taille, indice de quantité de couleurs désagréables, indice de contraste de couleurs et indice de l'épaisseur des bordures. Ils seront détaillés au chapitre B.2.

Après l'évaluation de la visibilité des symboles représentés sur la carte, ce modèle pourra déterminer les points faibles de la symbolisation qui peuvent gêner la lecture de cette carte. Il décidera alors quelles modifications il pourra apporter afin d'améliorer les valeurs des indices. Les modifications possibles seront les suivantes : la modification de l'ordre des couches, la modification des couleurs, la modification de la taille des bordures, et l'augmentation de la taille des surfaces. Ces opérations seront présentées au chapitre B.3.

Pour aboutir à une carte lisible qui convient à l'auteur de cette carte, le modèle agit selon une approche itérative semi-automatique. Une première itération d'évaluation de la visibilité des symboles grâce aux indices sera effectuée, le modèle proposera alors à l'utilisateur une série de modifications à appliquer. L'utilisateur choisira les modifications qu'il souhaite effectuer et obtiendra alors une nouvelle carte. Ces modifications agissant directement sur la représentation graphique de la carte, les valeurs des indices seront alors altérées. Une nouvelle itération correspondant à une évaluation de la visibilité des symboles et des propositions de modifications sera alors enclenchée. Cette approche itérative prendra fin lorsque l'utilisateur sera satisfait du résultat obtenu.

2. PROPOSITION D'UN SYSTEME D'INDICES POUR MESURER LA VISIBILITE DES OBJETS CARTOGRAPHIQUES

Afin de raisonner non pas sur l'objet géographique mais sur sa représentation, nous introduisons le concept d'objet cartographique comme cela a déjà été fait dans d'autres travaux de recherche (Chesneau 2006 ; Buard et Ruas 2009; Christophe 2009). Un objet cartographique porte la symbolisation d'un objet géographique. Ainsi dans notre contexte, une carte géographique est composée d'un ensemble de signes graphiques appelés « objets cartographiques ». Un objet cartographique (point symbolisé, ligne symbolisée, surface symbolisée) est la représentation graphique d'un objet géographique (bâtiment, littoral, végétation).

Un objet cartographique porte ainsi un code de symbolisation qui renvoie automatiquement à l'objet géographique. Un objet route est représenté par un objet cartographique de type linéaire qui suit la géométrie de la route, et dont la largeur et la couleur permettent d'en comprendre le type et l'importance. Cette modélisation est, de fait, proche de ce qui est nécessaire pour représenter un objet géographique sur un écran puisque chaque éditeur graphique représente des objets graphiques selon les capacités de ses bibliothèques graphiques. Il y a donc formellement trois couches d'information : les objets géographiques, les objets graphiques conceptuels et les objets graphiques de l'éditeur graphique. Lorsque nous parlons de l'objet graphique dans cette thèse, nous parlerons donc toujours des objets graphiques conceptuels ou encore « objets cartographiques ».

Différence entre « objet géographique » et « objet cartographique »

Un objet géographique est un ensemble d'informations (coordonnées, ensemble de coordonnées) enregistrées dans une base de données qui désigne un phénomène réel (bâtiment, littoral, végétation, etc.). Cet ensemble d'informations se doit d'être exact et précis.

Un objet cartographique quant à lui est une « *figuration graphique, colorée et/ou alphanumérique, affectée à un phénomène pour le représenter sur la carte* ». Ainsi, un objet cartographique (point symbolisé, ligne symbolisée, polygone symbolisé) est la représentation graphique, sur une carte, d'un objet géographique (bâtiment, littoral, végétation) et peut ne pas respecter totalement la position et les dimensions exactes de cet objet géographique.

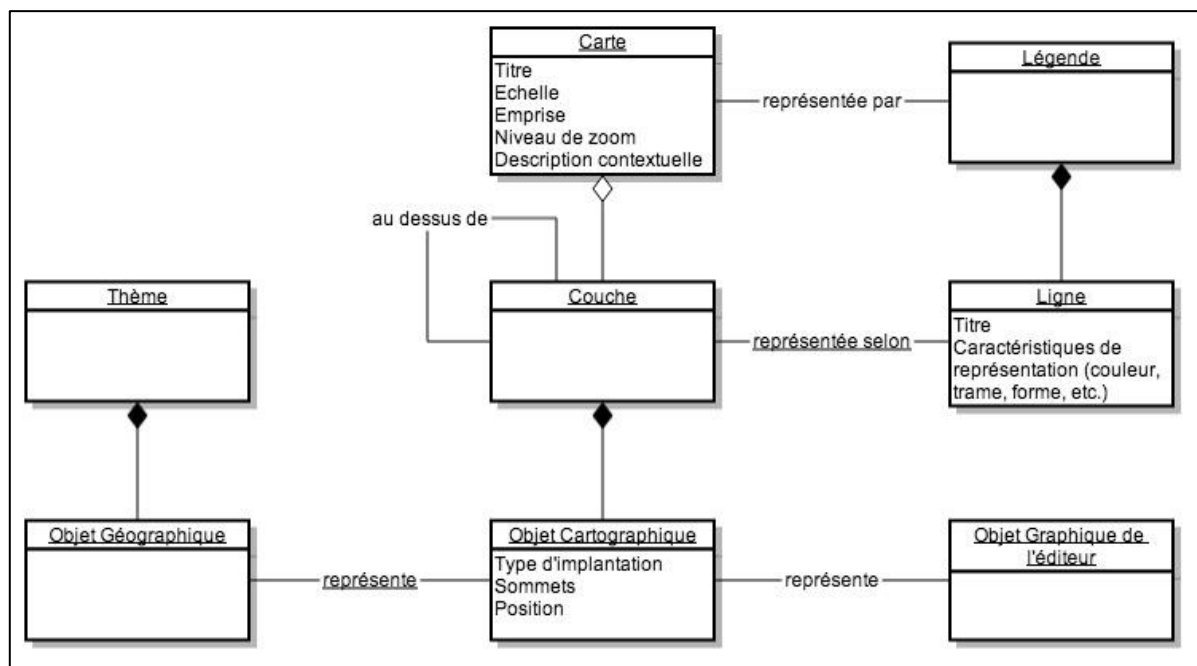


FIGURE 64 DIAGRAMME UML DES CONCEPTS DE BASE UTILISES DANS CETTE THESE

La Figure 64 montre les concepts de base utilisés dans le modèle et les liens entre ces concepts. La variable centrale dans le modèle est la couche graphique dont la symbolisation va être étudiée et éventuellement modifiée. Un espace à représenter est composé d'un ensemble de couches géographiques définies. Une couche géographique sera représentée par une seule couche cartographique mais, pendant la phase de conception et d'exploration, l'objectif est de trouver la meilleure couche cartographique parmi un ensemble de couches cartographiques. On peut donc dire qu'un espace peut être représenté par différentes cartes, l'objet est de trouver la meilleure carte, qui est celle composée par les meilleures couches cartographiques compte tenu d'un ensemble de contraintes.

Pour un SIG (Système d'Information Géographique), ces objets cartographiques sont groupés selon leur sémantique, sur des couches. Ainsi, une carte peut être vue comme la superposition de différentes couches (fond, végétation, hydrographie, bâtiments, route, etc.).

Nous définissons, ici, comme « fond » la couche qui est représentée sur la carte comme étant la couche la plus basse au-dessus de laquelle les autres couches (bâtiments, routes, végétation, etc.) sont superposées. Dans les exemples présentés dans ce mémoire de thèse, la couche « commune » est utilisée comme couche « fond ».

La visibilité des objets cartographiques représentés sur une carte dépend de plusieurs facteurs, entre autres: la conformité avec les règles sémiologiques classiques, l'harmonie (équilibre) entre la taille d'un objet et l'épaisseur de la bordure de cet objet, le chevauchement des objets et le contraste de couleurs (teinte et valeur) entre ces objets. En résumé, pour être visible et compréhensible, un objet doit assez gros, pas trop recouvert par d'autres objets et assez contrasté avec les objets qui l'entourent.

Dans la première partie de ce mémoire, l'ensemble des règles et contraintes de lisibilité, auquel est soumise une carte géographique, a été présenté. Dans cette seconde partie nous essaierons de traduire ces règles et ces contraintes sous la forme d'indices de visibilité.

En effet, pour améliorer la visibilité de ces objets, il faut d'abord être en mesure de l'évaluer. À cet effet, un ensemble d'indices est défini.

Une carte (qui est un assemblage de couches superposées dans un certain ordre) sera donc caractérisée par un ensemble d'indices. Le but de notre démarche globale sera donc de converger vers une carte ayant de « bons indices », c'est-à-dire des indices dont les valeurs expriment une visibilité correcte des objets. Un objet est considéré correctement visible s'il est **discernable** (ne peut être confondu avec ses objets voisins) et **compréhensible** (reconnu comme appartenant à son thème).

Un indice est une valeur qui rend compte d'un aspect de la carte. Chaque indice est lié à une règle sémiologique et reflète une situation particulière. Cette situation peut être soit **globale**, soit **locale**, soit **spécifique**. La situation globale concerne une caractéristique générale de la carte, telle que par exemple la quantité d'une couleur présente sur la carte. La situation locale se rapporte à un thème de la carte, comme par exemple le contraste de couleurs entre deux couches d'objets, ou l'épaisseur de la bordure des objets d'une couche en particulier. La situation spécifique concerne un unique objet, comme par exemple la cohérence entre la taille d'un objet avec la taille de sa bordure. Un changement de la situation par une modification de symbolisation des objets mènera à une modification de la valeur de l'indice associé à cette situation.

On définit donc trois niveaux d'analyse (voir Figure 65) :

- Le niveau « global » concerne la carte entière
- Le niveau « local » concerne un thème, une couche en général
- Le niveau « spécifique » concerne un objet (par rapport à lui-même ou par rapport à son voisinage).

Le niveau spécifique est utilisé pour faire les calculs sur chaque objet cartographique mais les analyses seront toujours faites au niveau local (d'une couche) ou global (de la carte).

Un indice dit local concerne donc tous les objets d'une couche et un indice dit global concerne tous les objets de la carte.

Tous les indices varient entre 0 et 1 : la valeur 0 correspond à la pire des représentations possibles concernant l'aspect mesuré par l'indice, et la valeur 1 correspond à la représentation idéale concernant le même aspect.

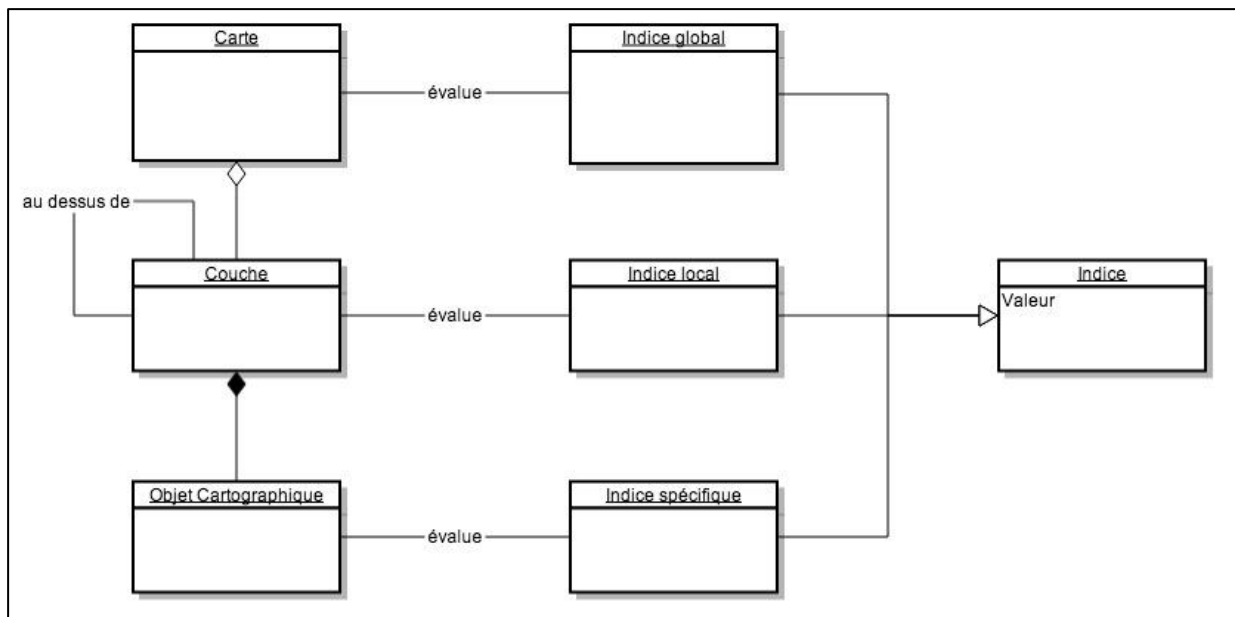


FIGURE 65 DIAGRAMME UML REPRESENTANT LES 3 NIVEAUX D'INDICES

Par ailleurs, on notera qu'une carte est toujours liée à **une notion d'échelle**, qu'il s'agisse d'une carte papier ou à l'écran ; et à chaque carte est associée une échelle qui est le rapport entre la taille de l'espace réel et la taille du support représentant cet espace. Dans notre proposition, un certain nombre d'indices sont fondés sur la notion de taille. Il s'agit de la taille de visualisation, donc de la taille des objets cartographiques et non de la taille des objets géographiques ; dit autrement, lorsque l'on fait un zoom sur une carte à l'écran on considère que l'on voit une autre carte.

Les indices définis pour exprimer la visibilité d'une carte et donc la visibilité de ses objets cartographiques sont les suivants :

- Indice de superposition,
- Indice de taille,
- Indice de quantité de couleurs désagréables,
- Indice de contraste de couleurs,
- Indice d'épaisseur de bordure.

Certains indices comme l'indice de taille et l'indice de contraste de couleurs, reposent sur des théories bien explorées et validées. Tandis que d'autres indices comme l'indice de couleurs désagréables, ont nécessité une expérimentation pour valider leur impact sur la visibilité des objets par les lecteurs de la carte. Ces expérimentations, au travers de tests, seront présentées au chapitre B.5.

Les calculs des valeurs de tous ces indices reposent en grande partie sur le calcul de surfaces d'objets cartographiques. C'est pourquoi dans ce qui suit nous présenterons d'abord les techniques utilisées pour le calcul de surface d'objets cartographiques, puis nous détaillerons par la suite les indices de visibilité.

Calcul de surface

Que ce soit pour calculer la taille d'un objet ou pour calculer la quantité de couleurs désagréables, connaître la surface d'un objet est toujours nécessaire.

Dans ce travail, le calcul des surfaces a été réalisé sur les objets cartographiques lors de l'étape de construction de la carte. Ce calcul n'est donc pas fait sur des objets matriciels/rasters, mais sur des objets au format vectoriel dont nous avons la totalité des informations mathématiques nécessaires (coordonnées des sommets, segments, sous-objets, etc.) et sur lesquels nous pouvons réaliser des fonctions comme l'union, l'intersection, la soustraction, etc.

2.1. CREATION D'ENVELOPPES ET DE BUFFERS

Dans ce qui suit, la création d'un nouvel objet distinct des symboles cartographiques sera nécessaire. Cet objet géométrique devra englober graphiquement un ou plusieurs symboles cartographiques et aura comme but d'en simplifier la manipulation pour le calcul de la surface. Cet objet portera le nom de « buffer ».

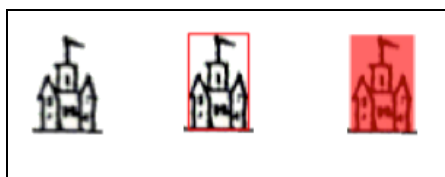


FIGURE 66 EXEMPLE DE BUFFER (EN ROUGE) QUI ENGLOBE UN OBJET GRAPHIQUE « CHATEAU »

Un buffer (ou zone-tampon en français) est un symbole surfacique qui entoure un symbole initial et peut donc prendre sa forme (ou s'en approcher) mais avec une taille différente.

Un buffer peut être un objet graphique simple comme par exemple le « rectangle englobant », (le plus petit rectangle contenant l'objet initial, voir Figure 66), ou un objet graphique de tracé plus complexe parce que reproduisant la forme de l'objet initial mais ayant une taille différente. Les deux types de buffer sont présentés dans la figure suivante (Figure 67).

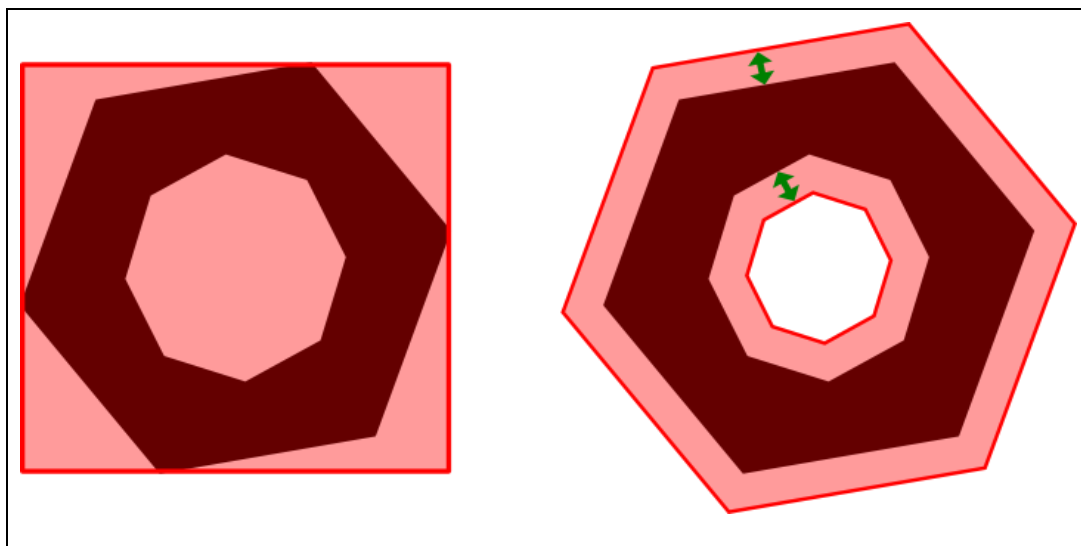


FIGURE 67 LES DEUX TYPES DE BUFFERS. A GAUCHE, UN BUFFER SIMPLE (1IER TYPE); A DROITE UN BUFFER DIT « PRECIS » (2IEME TYPE) QUI REPRODUIT LA FORME INITIALE

Lors de la création d'un buffer du second type (c'est-à-dire un objet graphique reproduisant la forme de l'objet initial), trois paramètres doivent être pris en considération : le symbole pour lequel le buffer est créé, une « distance », et le type des extrémités (Figure 69).

Le symbole pour lequel le buffer est créé est n'importe quel objet cartographique dont l'implantation peut être surfacique, linéaire ou ponctuelle.

La distance est la distance qui sépare les bordures du buffer des bordures du symbole initial. Elle sera utilisée lors de la construction des extrémités ou bordure du buffer. Cette distance peut être positive (on obtient alors un buffer plus grand que le symbole initial), négative (buffer plus petit) ou nulle (buffer de même dimension). Cette distance est constante tout autour du symbole initial (flèches vertes du second symbole dans la Figure 67).

Le type des extrémités décrit la forme que doivent prendre les extrémités : droites, arrondies, ou carrées, (voir Figure 68).

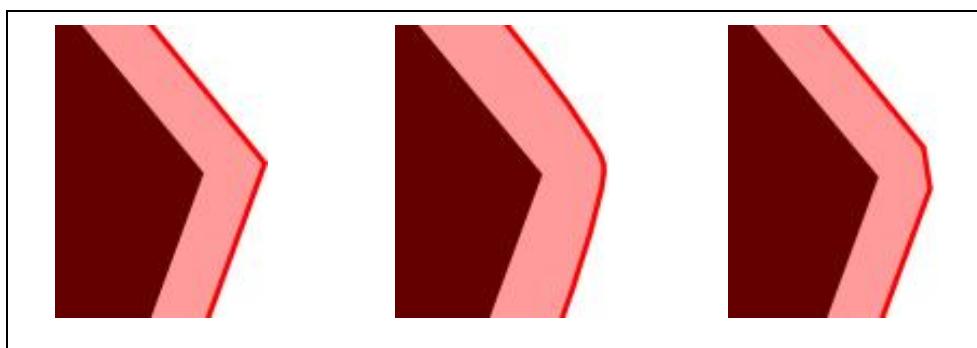


FIGURE 68 EXEMPLE ILLUSTRANT TROIS TYPES D'EXTREMITES (DE GAUCHE A DROITE) DROITES, ARRONDIES, CARREES

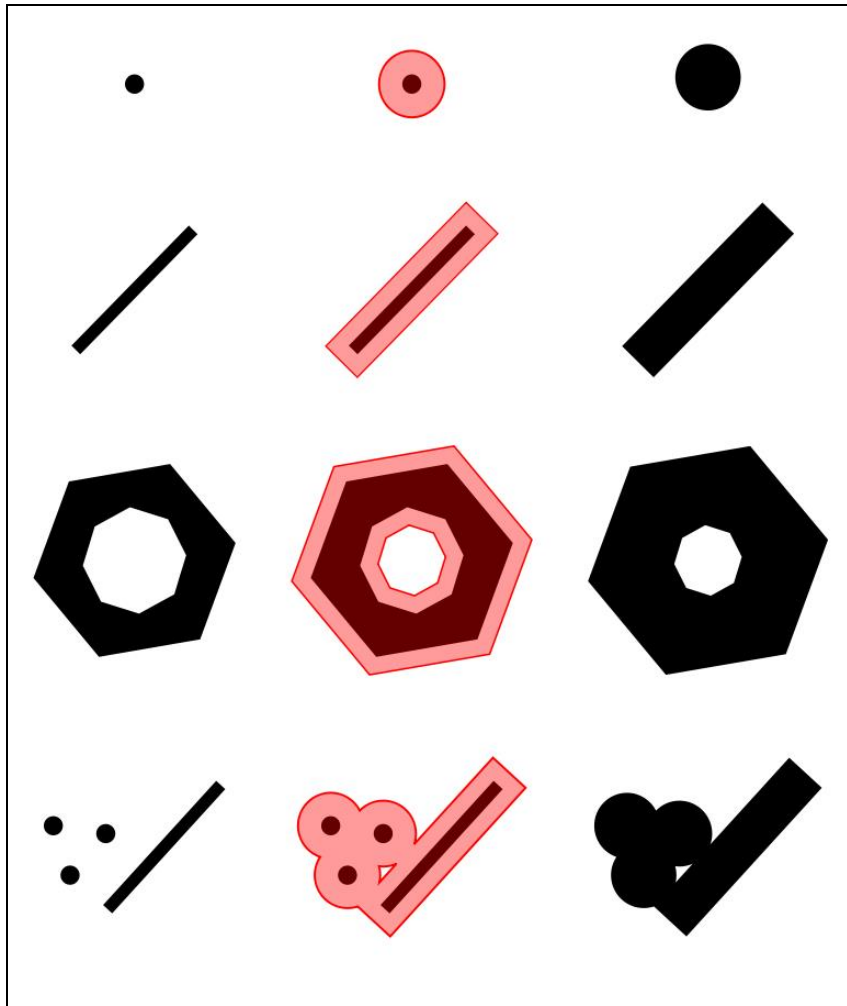


FIGURE 69 CREATION DE BUFFERS (COLONNE CENTRE ET DROITE) D'OBJETS INITIAUX (COLONNE GAUCHE) PONCTUELS, LINEAIRES, SURFACIQUES, OU MULTIPLES

De par sa simplicité, un buffer du premier type est plus facile et plus rapide à créer dans des conditions réelles de manipulation d'une carte géographique qu'un buffer du second type. Ceci devient d'autant plus vrai que le nombre d'objets concernés est élevé. Les buffers du second type sont plus précis et donc moins rapides à générer ; néanmoins, dans le cadre de cette thèse ce sont les buffers de ce type (buffer précis) qui ont été utilisés pour les objets initiaux vectoriels. Pour les objets ponctuels raster (ou matriciels), le système utilisé ne permettait pas de générer des buffers précis, ce sont donc les buffers du premier type qui ont été utilisés.

Dans ce travail également, le type d'extrémité utilisé dépend de celui des objets initiaux. Ainsi si l'objet graphique initial a été dessiné avec des extrémités droites, ce sera ce type d'extrémités droites qui sera utilisé pour dessiner son buffer. Il en va de même pour les types d'extrémités arrondies et carrées.

Dans ce modèle, la création des différents buffers a été réalisée en utilisant la librairie open source JTS (Java Topology Suite) qui offre des méthodes de manipulations géométriques (buffer, fusion, intersection, etc.) simples d'usage et relativement rapides à l'exécution.

2.2. CALCUL DE SURFACE

Afin de pouvoir évaluer la visibilité des signes graphiques que sont les objets cartographiques, leur taille ainsi que celles de leurs bordures doivent pouvoir être calculées.

A priori, le calcul de surface est une fonctionnalité standard dans les SIG, pourtant un problème a été relevé lors de ce calcul de surface : un SIG ne sait pas calculer la surface graphique d'un objet ponctuel ou linéaire (exemple Figure 70). Ceci est dû au fait que les objets linéaires n'ont théoriquement aucune surface puisque que ce sont des segments de droites. De même pour les objets ponctuels qui ne sont que des points et qui donc ne sont qu'une représentation d'une position dans l'espace et ne sont pas une surface eux-mêmes.

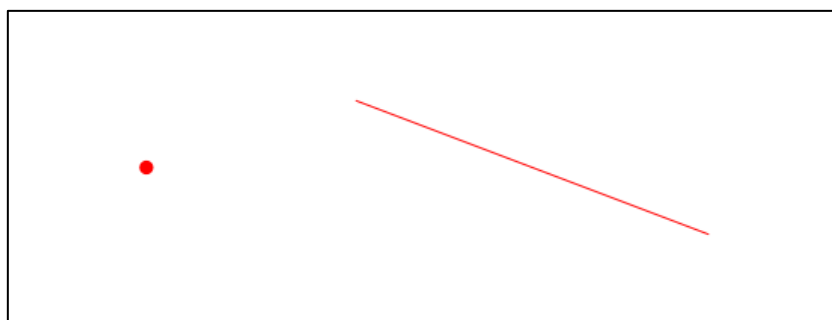


FIGURE 70 EXEMPLE D'OBJETS PONCTUEL ET LINEAIRE

Pourtant, en pratique, ces signes graphiques qui représentent des données linéaires et ponctuelles sont des signes visibles, existants, et qui occupent un espace sur la carte. Graphiquement ils ont donc bien une surface.

Calcul de la surface des signes d'implantation ponctuelle

Un signe ponctuel est généralement représenté par un dessin qui peut être soit une forme géométrique, telle qu'un disque ou un carré ; soit une lettre de l'alphabet telle que « H » pour hôpital ou « P » pour parking (Figure 71) ; soit une petite forme reconnaissable et qui symbolise l'objet, comme une croix pour une église ou un écrou pour une usine.

Un signe linéaire est généralement représenté par une bande (rectangle) allongée et parfois cadré par deux autres bandes d'épaisseur moindre (Figure 71).

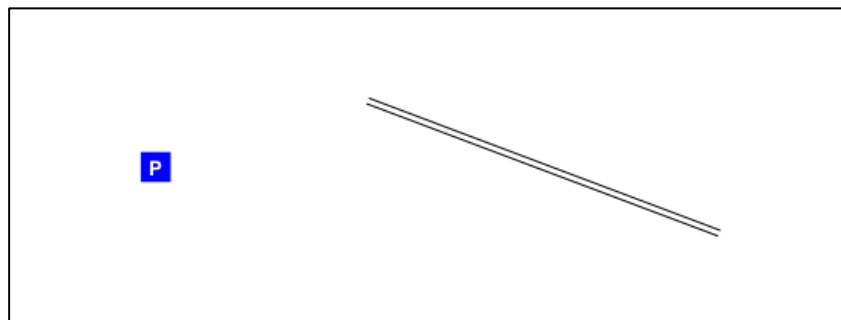


FIGURE 71 EXEMPLE DE SIGNES GRAPHIQUES PONCTUEL ET LINEAIRE

Les signes ponctuels pouvant être d'une multitude de formes, un choix devait être fait quant à la méthode du calcul de leur surface implémentée dans notre système. Cette méthode peut être **soit précise** mais nécessite un temps de calcul important **soit plus rapide** mais moins précise. Dans le premier cas, la formule mathématique de la surface de l'objet changera en fonction de la forme de cet objet. La formule sera différente si l'objet est une croix ou un carré, a fortiori si l'objet est un dessin complexe composé de plusieurs formes distinctes telles que des rectangles, des cercles, des arcs, des lignes, etc.

Dans le second cas, la surface de l'objet sera celle du plus petit rectangle englobant cet objet. Le calcul de sa surface en devient donc sensiblement simplifié. Afin de choisir quelle méthode adopter, un test a été réalisé qui consiste en la comparaison entre les surfaces obtenues avec l'une ou l'autre des deux méthodes. Le dessin sur lequel le test a été réalisé est un symbole graphique qui représente un château. Le fond qui entoure le dessin est transparent, tandis que le fond interne du dessin est un fond opaque blanc. Superposé à d'autres symboles, ce dessin de château sera visible dans sa totalité et son fond ne sera pas affecté par la couleur du symbole qui se trouve derrière lui. D'autre part, les symboles qui se trouvent en dessous de celui-ci seront recouverts par la forme exacte du dessin de château vu que le fond autour de ce dessin est transparent. Ceci est important à savoir avant de calculer la surface en utilisant la première méthode précise.

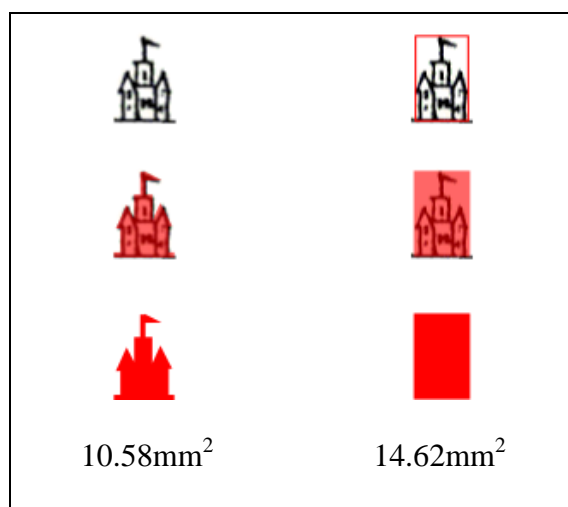


FIGURE 72 VALEURS DE SURFACE OBTENUES SELON L'UTILISATION DE LA METHODE PRECISE (A GAUCHE) OU LA METHODE RAPIDE (A DROITE). OBJET « CHATEAU » (JEAN G., 1989)

Lors de l'exécution de la première méthode (colonne de gauche de la Figure 72), un buffer précis a été dessiné manuellement. Ce buffer reproduit la forme exacte du dessin en un seul symbole. La surface calculée avec cette première méthode est égale à 10.58 mm^2 . Lors de l'exécution de la seconde méthode (colonne de droite), le buffer rectangulaire a été dessiné automatiquement par le système, sa surface calculée par cette méthode est égale à 14.62 mm^2 .

Ainsi, ces deux méthodes de calcul peuvent engendrer des résultats (surface réelle, surface du rectangle englobant) présentant des écarts importants selon la forme de l'objet considéré. Dans l'exemple présenté ci-dessus, la différence des résultats selon l'utilisation de la première

ou de la deuxième méthode, est de 4 mm^2 , soit près du $2/5^{\text{ème}}$ de la surface de l'objet initial. À l'échelle de l'objet cet écart est énorme, mais étant donné que les objets ponctuels ne sont pas nombreux sur une carte, et que leur surface est très petite en comparaison avec les autres objets cartographiques (polygones, lignes), cet écart ne génère pas une marge d'erreur importante qui pourrait modifier les résultats finaux des indices de visibilité. Dans l'absolu, l'implémentation d'un calcul de surface précis et rapide à l'exécution serait meilleure et devrait être envisagée. Mais dans ce travail, de par sa simplicité et la facilité de sa mise en œuvre, c'est la deuxième méthode du « rectangle englobant » qui a été retenue pour calculer les surfaces des objets ponctuels.

Calcul de la surface des signes d'implantation linéaire

Concernant **les signes linéaires**, cette même technique de buffer sera utilisée par segments. Si un signe linéaire (par exemple une route) est parfaitement droit, le calcul de sa surface revient à calculer la surface d'un rectangle. Par contre si le signe linéaire est composé de plusieurs segments de droite, le calcul de la surface de ce signe revient à la somme des surfaces de ces segments de droite qui composent le signe (Figure 73).

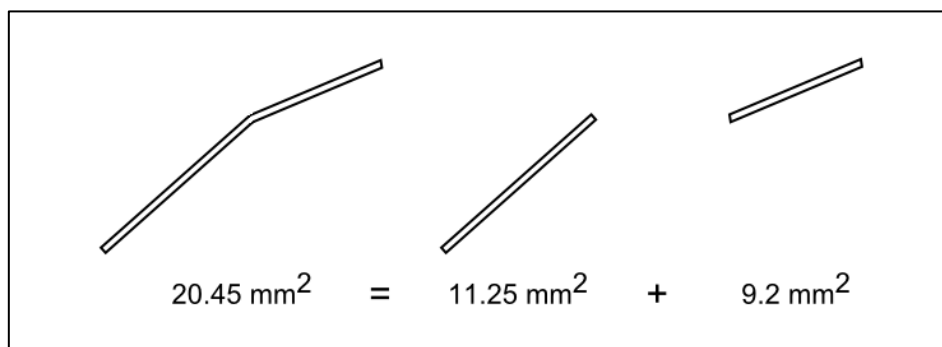


FIGURE 73 CALCUL DE SURFACE D'UN OBJET LINEAIRE EN LE DECOMPOSANT EN DEUX SOUS-OBJETS LINEAIRES

Une petite nuance existe lors du calcul de la surface des objets linéaires. Ce calcul de surface dépend du mode de représentation des objets linéaires par le SIG utilisé. Plus précisément, il dépend de la façon dont sont représentées les extrémités de ces objets, et de la façon dont sont composés plusieurs objets linéaires pour en former un seul plus grand.



FIGURE 74 DEUX FORMES DE REPRESENTATION DES EXTREMITES DES SYMBOLES LINEAIRES

De manière générale, les extrémités des symboles linéaires sont représentées de deux façons (Figure 74) : soit une représentation sous forme **droite** (A) formant un angle droit avec les côtés de la bande ; soit une représentation sous forme **arrondie** (B).

La liaison entre les symboles linéaires se fait également de deux façons : soit par alignement avec le plus proche des deux symboles sans qu'il y ait superposition ; soit par superposition des deux extrémités qui vont fusionner.

Dans le premier cas, un espace vide sera formé entre les deux bandes (Figure 75 A1 et B1, la surface rouge montre l'espace vide). Cet espace peut être vide ou bien peut être rempli (avec les mêmes caractéristiques visuelles que les deux symboles linéaires connexes) mais dans les deux cas il occupera un espace sur la carte sans qu'il ne soit inclus dans le calcul de surface. Dans le deuxième cas, la superposition formera un objet géométrique dont la surface sera comptabilisée deux fois dans la surface totale des symboles puisque cet objet est inclus dans les deux symboles linéaires (Figure 75 A2 et B2, objets jaunes).

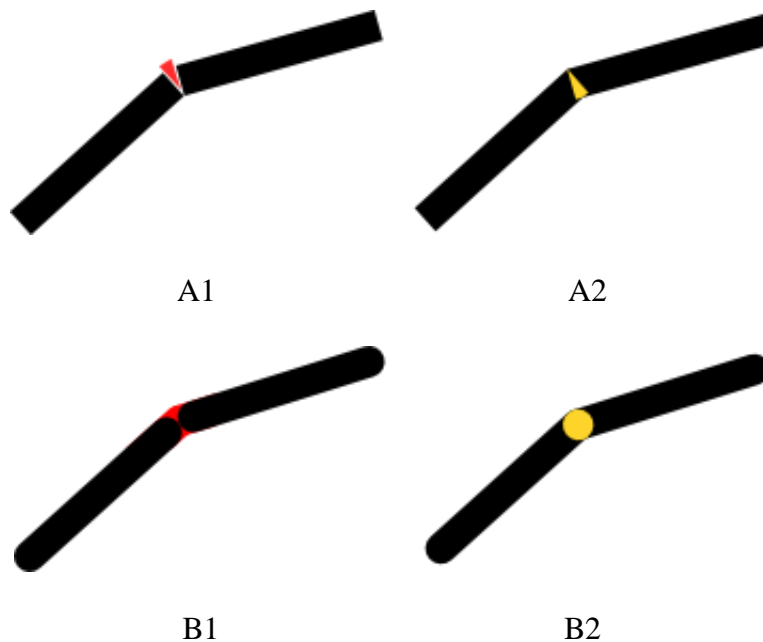


FIGURE 75 LES DEUX TYPES DE LIAISONS ENTRE DEUX SYMBOLES LINEAIRES : LIAISON PAR PROXIMITE, LIAISON PAR SUPERPOSITION

Des tests ont été réalisés pour décider quelle type de représentation sera utilisée, et bien que les résultats aient été proches et les différences minimales, la représentation en forme droite (Figure 74 A) et la liaison avec superposition (Figure 75 A2) ont été retenues. La taille de l'objet géométrique qui est inclus deux fois lors du calcul de surface est plus petite que celle engendrée par la liaison B2 et est de manière générale proche du seuil de visibilité présenté plus haut il n'influe donc que très peu sur la visibilité des objets linéaires dont il fait partie car il est justement fusionné à ces objets.

Calcul de la surface des signes d'implantation surfacique

Le calcul de surface des objets surfaciques revient à un simple calcul de surface de polygones. Des fonctions de calcul de ces surfaces existent déjà dans des bibliothèques et sont réutilisées dans cette thèse.

Calcul de la bordure des signes d'implantation linéaire ou surfacique

Dans plusieurs cas, les objets graphiques (surfiques ou linéaires) présents sur une carte géographique possèdent une bordure plus ou moins épaisse, plus ou moins contrastante avec la représentation, et en particulier avec la couleur, de l'objet lui-même. Si on applique simplement la méthode ci-dessus, on ne considère pas la surface contenue dans la bordure. Nous proposons d'améliorer la méthode précédente pour prendre en compte la surface occupée par la bordure.

Le système utilisé dans cette thèse, GeOxygene, positionne la bordure à cheval sur la limite de l'objet (voir Figure 76). L'épaisseur de la bordure se trouve donc divisée en deux, une première moitié se superpose à l'objet en question et diminue donc sa surface visible, et une deuxième moitié est positionnée à l'extérieur de l'objet et diminue la surface visible des objets voisins si cette bordure se trouve au-dessus d'eux. Ceci est très important parce que la surface intérieure de l'objet est diminuée par la bordure, sa couleur va donc moins se voir. Si cette surface intérieure est trop petite, sa couleur ne pourra pas être correctement perçue, le sens de l'objet peut donc devenir ambigu.

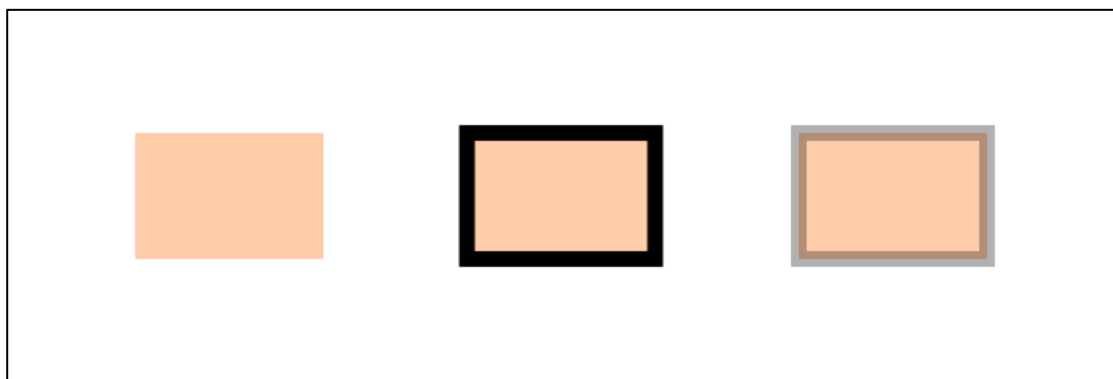


FIGURE 76 AJOUT D'UNE BORDURE SUR UN OBJET

Le calcul de la surface d'un objet en prenant en compte sa bordure revient donc à calculer la surface du buffer (polygone) englobant cet objet ainsi que sa bordure (Figure 77 a). Ce buffer peut être considéré comme une fusion entre le signe graphique « objet » et le signe graphique « bordure ».

Le calcul de la surface visible de l'objet revient à calculer la surface du polygone résultant de la soustraction entre l'objet et la bordure (Figure 77 b). Ce polygone sera appelé « polygone visible de l'objet ».

Et finalement, le calcul de la surface de la bordure revient à calculer la surface du polygone résultant de la soustraction entre le buffer et le polygone visible de l'objet (Figure 77 c).

Cette méthode est utilisée dans le calcul de surface des objets aussi bien surfiques que linéaires.

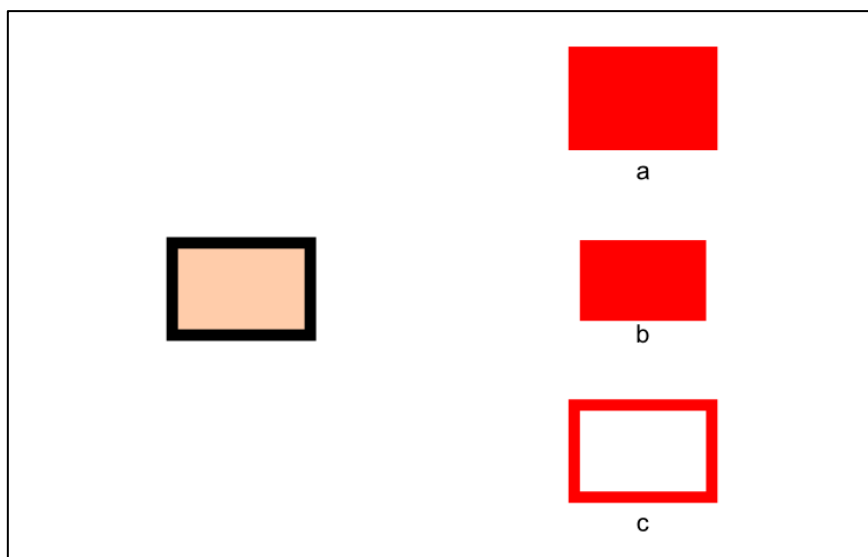


FIGURE 77 LES DIFFERENTS POLYGONES UTILISES LORS DU CALCUL DE SURFACE D'UN OBJET ET DE SA BORDURE

Ces différentes méthodes de calcul de surface ; calcul de surface d'objets ponctuels, linéaires, surfaciques, et de bordure ; seront utilisées lors du calcul des indices de visibilité présentés dans les sections suivantes.

2.3. INDICE DE SUPERPOSITION

Les objets cartographiques à afficher appartiennent à différentes couches dites thématiques. Dans une couche, les objets ne se superposent pas. En revanche, quand plusieurs couches sont affichées simultanément, les objets des différentes couches peuvent se superposer les uns aux autres. C'est notamment le cas lorsqu'on cartographie les données thématiques sur un fond topographique contenant des objets topographiques. Dans ce cas, certaines données topographiques disparaissent. **L'indice de superposition a donc pour objectif de caractériser le taux de chevauchement des objets de la carte pour un ordre donné d'affichage des couches.** L'objectif d'utilisation de cet indice est que la surface visible de tous les objets pour toutes les couches affichées simultanément soit maximale.

En outre, d'un point de vue sémantique, une pondération selon l'importance sémantique des couches est effectuée afin de s'assurer que les couches importantes pour la thématique de la carte sont visibles au maximum.

Par exemple, dans la carte suivante (Figure 78), la couche de végétation se superpose à celle des routes (zones entourées en noir), ce qui dégrade la visibilité des routes. Le thème routier étant en général important, on pourra affecter un poids particulièrement fort au recouvrement des objets cartographiques routes. En Figure 78, le réseau routier en zone de végétation a complètement disparu, ce qui ne permettrait pas de traiter convenablement une problématique concernant un incendie ou plus simplement la desserte de la zone.



FIGURE 78 UNE CARTE AVEC UN ORDRE DE COUCHES INCORRECT

Cet indice peut traduire une situation locale ou une situation globale.

Indice local de superposition

La valeur d'un indice local (à une couche) correspond au taux de surface visible d'une couche. L'algorithme (Algorithme 1) du calcul de l'indice de recouvrement local se déroule comme suit :

- identifier toutes les couches de données chevauchant la couche concernée,
- fusionner toutes ces couches,
- faire l'intersection entre la couche issue de la fusion et la couche concernée.

La valeur de l'indice correspond au rapport entre la surface visible de la couche et sa surface totale.

Cette valeur varie entre 0 et 1 qui correspondent respectivement à une couche complètement recouverte par d'autres couches et qui devient donc invisible (valeur 0), et à une couche qui n'est pas du tout masquée par d'autres ce qui en fait une couche totalement visible (valeur 1). Optimiser la valeur de cet indice consiste donc à le faire tendre vers 1, c'est-à-dire minimiser la surface d'intersection des couches.

```

Pour chaque Couchei dans Carte
    recouvert = Couchei
    recouvrant = fusion Couches dessus Couchei
    Si recouvrant intersecte recouvert Alors
        surfaceVisible(couchei) = recouvert.aire -
intersection(recouvert, recouvrant).aire
        indiceLocal(couchei) = surfaceVisible(couchei) /
recouvert.aire
    Sinon
        indiceLocal (couchei) = 1
    Fin Si
Fin Pour

```

ALGORITHME 1 ALGORITHME SIMPLIFIE DU CALCUL DE L'INDICE LOCAL DE SUPERPOSITION DE CHAQUE COUCHE

Indice global de superposition

La valeur de l'indice global de superposition correspond à la qualité de l'ordre de superposition des différentes couches de la carte. Cette valeur est la moyenne pondérée de tous les indices locaux de superposition de la carte. Cette moyenne doit tenir compte de l'importance sémantique des couches de données. Certaines couches peuvent être plus importantes que d'autres, par exemple : les routes sont plus importantes pour une application de desserte urbaine que les rivières ; ou encore chacune des couches de données est plus importante que le fond de carte. Pour tenir compte de ces différences d'importance des couches du point de vue sémantique, des pondérations ont été introduites afin de calculer la moyenne des indices locaux. Une pondération par défaut a été utilisée lors des tests. Cette pondération correspondant aux cartes topographiques classiques, elle peut être modifiée en fonction du type et des objectifs de chaque carte.

Les coefficients λ_i sont, par défaut, distribués comme suit :

- Importance forte : Routes et bâtiments $\lambda_1=3$
- Importance moyenne : Hydrographie $\lambda_2=2$
- Importance faible : Végétation et autres couches $\lambda_3=1.5$
- Importance neutre : Fond $\lambda_4=1$

La valeur globale de l'indice de surface visible sera calculée comme suit :

$$iSv = \frac{(\sum_{i=1}^a t1_i) * c1 + (\sum_{i=1}^b t2_i) * c2 + (\sum_{i=1}^c t3_i) * c3 + (\sum_{i=1}^d t4_i) * c4}{a * \lambda_1 + b * \lambda_2 + c * \lambda_3 + d * \lambda_4}$$

Avec :

iSv = Valeur de l'indice de superposition

a = Nombre de couches d'importance forte

b = Nombre de couches d'importance moyenne

c = Nombre de couches d'importance faible

d = Nombre de couches d'importance standard (normalement une seule)

t1_i = indice de visibilité de la i^{ème} couche d'importance forte

t2_i = indice de visibilité de la i^{ème} couche d'importance moyenne

t3_i = indice de visibilité de la i^{ème} couche d'importance faible

t4_i = indice de visibilité de la i^{ème} couche d'importance standard

```
soit iForte = iMoyenne = iFaible = iNeutre = 0
soit nForte = nMoyenne = nFaible = nNeutre = 0
soit  $\lambda_1 = 3$ ,  $\lambda_2 = 2$ ,  $\lambda_3 = 1.5$ ,  $\lambda_4 = 1$ 

// un tableau qui à chaque couche associe son indice local
soit indicesLocaux = Map<Couche, Nombre>

soit numerateur = denominateur = indiceGlobal = 0

Pour chaque Couche dans Carte
  Si importance(Couche) == FORTE ALORS
    iForte += indicesLocaux.getIndice(Couche)
    nForte = nForte + 1
  Sinon Si importance(Couche) == MOYENNE ALORS
    iMoyenne += indicesLocaux.getIndice(Couche)
    nMoyenne = nMoyenne + 1
  Sinon Si importance(Couche) == FAIBLE ALORS
    iFaible += indicesLocaux.getIndice(Couche)
    nFaible++
  Sinon Si importance(Couche) == NEUTRE ALORS
    iNeutre += indicesLocaux.getIndice(Couche)
    nNeutre = nNeutre + 1
  Fin Si
Fin Pour

numerateur = iForte *  $\lambda_1$  + iMoyenne *  $\lambda_2$  + iFaible *  $\lambda_3$  +
iNeutre *  $\lambda_4$ 
denominateur = nForte *  $\lambda_1$  + nMoyenne *  $\lambda_2$  + nFaible *  $\lambda_3$  +
nNeutre *  $\lambda_4$ 
indiceGlobal = numerateur / denominateur
```

ALGORITHME 2 ALGORITHME SIMPLIFIE DU CALCUL DE L'INDICE DE SUPERPOSITION GLOBAL D'UNE CARTE

2.4. INDICE DE TAILLE

En dessous d'une certaine taille, un objet graphique ne peut plus être discerné correctement et son sens n'est plus compris par le lecteur de la carte (voir partie A.4 *Efficacité des cartes*).

Dans ce qui suit, nous désignons par « objet de petite taille » tout objet graphique dont la surface est inférieure au seuil minimal de perception présenté dans la section A.4 de cette thèse. Ce seuil minimal de perception varie entre 0.2 et 0.5 mm² selon la forme du signe en question. Un seuil aux alentours de 0.5 mm² de surface sera utilisé ici car il peut être considéré comme un seuil général au-dessus duquel tous les objets peuvent être perçus et reconnus quelles que soient leurs formes.

Ce seuil de visibilité a été défini par les cartographes pour des objets dessinés sur du papier, et dans l'absolu, ne dépend pas de facteurs externes comme l'épaisseur de la mine du crayon par exemple. Lorsque ces objets sont dessinés sur un écran, un facteur externe s'impose : la dimension des pixels utilisée par cet écran. Pour rappel le pixel est la plus petite unité affichable à l'écran. C'est un petit carré dont la taille varie sur les ordinateurs entre 0.18 à 0.6 mm de côté.

Ainsi, selon la taille de l'écran et la résolution utilisée, la taille des pixels varie ainsi que le seuil de visibilité qui est exprimé en entiers de pixels. C'est pourquoi la dimension exacte du seuil qui sera utilisé pour le calcul de cet indice dépendra des dimensions de l'écran et de la résolution utilisés.

Dans ce travail, les écrans utilisés ont une dimension de 17 pouces (en diagonale) pour une résolution de 1600x1200 pixels. Pour cette configuration, la taille d'un pixel est approximativement de 0.215 millimètre, le seuil minimal de perception qui sera utilisé pour le calcul de cet indice (et qui sera le plus proche de celui défini plus haut) peut donc être déterminé par le calcul suivant :

$$\text{Seuil minimal de perception} = (0.215 \times 3)^2 = 0.645 \text{ mm}^2 = 9 \text{ pixels}$$

$$\text{Seuil minimal de perception} = 0.215 \times 3 = 0.645 \text{ mm}$$

$$\text{qui correspond à une surface de } 3 \times 3 = 9 \text{ pixels}$$

L'indice de taille permet de déterminer si le nombre d'objets de petite surface difficilement distinguables présents sur la carte est élevé ou non, la difficulté de lecture de ces objets de petite surface pouvant engendrer des problèmes de compréhension de la carte.

L'utilisation de cet indice permet d'indiquer à l'utilisateur si l'échelle de représentation utilisée est adéquate ou non aux dimensions des objets géographiques représentés. Le changement de l'échelle engendrera un changement de la valeur de cet indice dans un sens ou dans l'autre. Un processus de généralisation approprié, qui modifiera la représentation des objets géographiques, améliorera quant à lui la valeur de cet indice.

Exemple : dans la Figure 79, certains objets (signalés par des flèches) sont de trop petite taille, ce qui rend impossible l'identification de leurs thèmes respectifs.

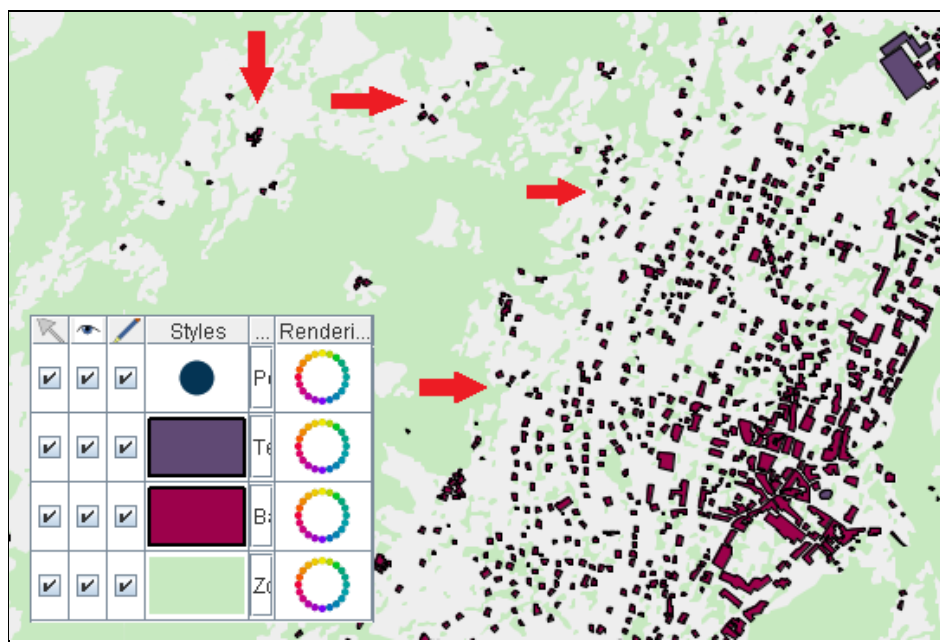


FIGURE 79 UNE CARTE QUI CONTIENT PLUSIEURS PETITS OBJETS ILLISIBLES

L'indice de taille se décline en un indice de taille global qui concerne la carte dans sa totalité, et des indices de taille locaux qui concernent chacun une couche de données en particulier.

La valeur de chaque indice varie entre 0 et 1 correspondant respectivement à l'absence d'objets de petite taille, et à la présence exclusive d'objets de petite taille.

Il se calcule selon cette formule :

$$iT = 1 - \frac{OP}{OT}$$

Avec :

iT = Valeur de l'indice de taille

OP = Nombre d'objets de petite taille de la couche / de l'ensemble des couches

OT = Nombre d'objets total de la couche / de l'ensemble des couches

Son calcul est donc simplifié de la sorte :

$$iT = 1 - \frac{\text{Nombre d'objets de petite taille}}{\text{Nombre d'objets total}}$$

L'Algorithme 3 ci-dessous décrit le calcul pour l'indice global (les objets de petite taille de toute la carte). Pour l'indice local, il suffit de l'appliquer sur une couche au choix.

```

soit seuil = 0.645 (9 pixels)
soit petitsObjets = tousObjets = indice = 0

Pour chaque Couche dans Carte (pour le calcul global)
  Pour chaque Objet dans Couche
    Si Objet.aire < seuil Alors
      petitsObjets = petitsObjets + 1
    Fin Si
    tousObjets = tousObjets + 1
  Fin Pour
Fin Pour

indice = 1 - petitsObjets / tousObjets

```

ALGORITHME 3 CALCUL DE L'INDICE DE TAILLE GLOBAL POUR LA TOTALITE DE LA CARTE

2.5. INDICE DE QUANTITE DE COULEURS DESAGREABLES

Nous avons remarqué lors des tests menés, et présentés ultérieurement dans ce mémoire au chapitre B.5, que l'utilisation de certaines couleurs en grande quantité sur une carte peut causer un inconfort visuel chez le lecteur de la carte, l'inconfort pouvant mener à des erreurs de séparation visuelle des objets et à une mauvaise compréhension de la carte, ou à un rejet global de la carte.

Dans l'absolu aucune couleur n'est désagréable, mais les couleurs vives ne sont pas utilisées en grande quantité parce qu'elles empêchent de poser son regard à différents endroits de la carte comme ce doit être le cas pour les cartes à lire. L'indice de quantité de couleurs désagréables permet donc de déterminer et de faire ressortir les couleurs très visibles et/ou présentes en grande quantité sur la carte et ainsi d'éviter l'abondance de couleurs menant à l'inconfort visuel telles que les couleurs fluorescentes, les couleurs vives, les couleurs grisées, ou les couleurs très foncées.

Par exemple dans la carte suivante (Figure 80) les routes sont représentées par des signes linéaires de couleur rouge. Les bâtiments sont représentés par des signes surfaciques de couleur rouge également. Etant donné que les signes graphiques symbolisant les routes sont assez épais et que ces signes et ceux qui représentent les bâtiments ont la même couleur, ceci mène à une forte présence de la même couleur vive qui gêne la lecture de la carte. L'indice de quantité de couleurs désagréables doit donc prévenir l'auteur de la carte de cette particularité.

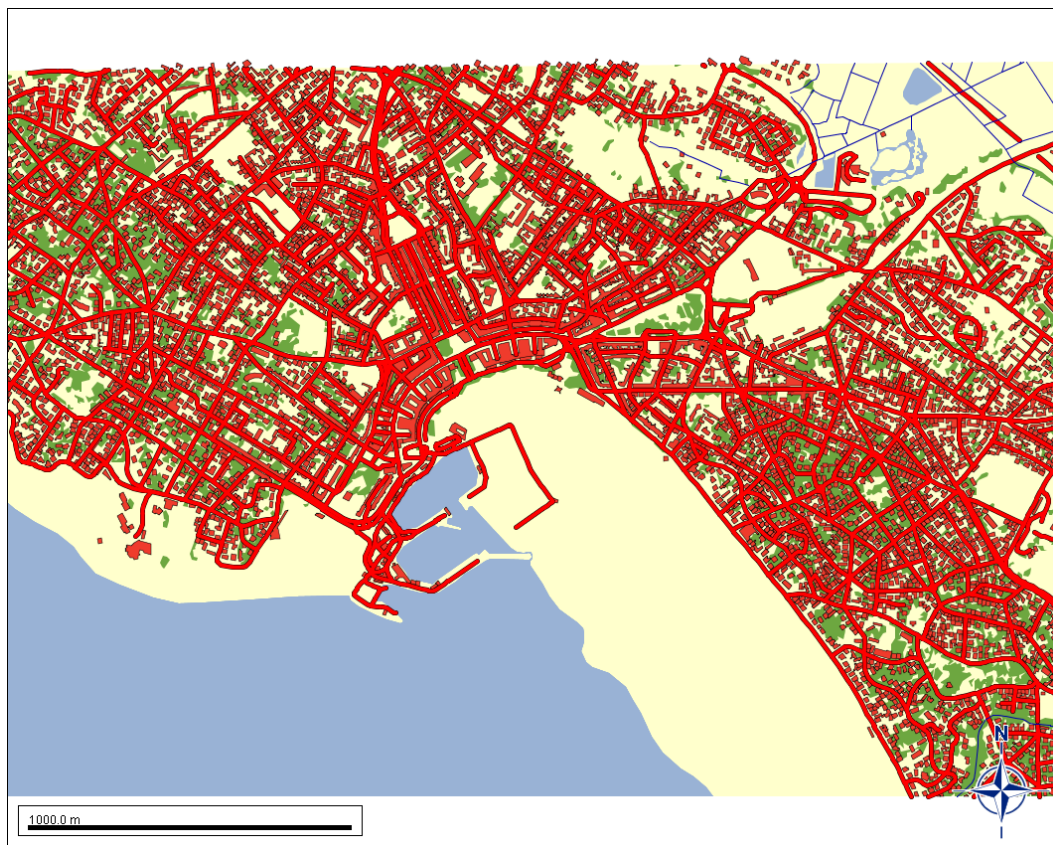


FIGURE 80 UNE CARTE AYANT UN ROUGE VIF TROP PRESENT

La valeur de l'indice évolue entre 0 et 1, correspondant respectivement à l'utilisation exclusive de couleurs désagréables et à l'utilisation d'aucune couleur désagréable.

La notion de couleur désagréable a une composante subjective. Pour détecter les couleurs désagréables et le seuil à partir duquel une couleur désagréable rend l'ensemble de la carte désagréable, des tests ont donc été entrepris. Ils sont présentés au chapitre B.5. Il ressort de ces tests, que les lecteurs peuvent tolérer à peu près jusqu'à 20% de couleurs désagréables sur la carte. L'indice devant refléter le ressenti des lecteurs, sa valeur devra donc se dégrader rapidement avant les 20%, et plus lentement ensuite, ce qui incitera l'auteur de la carte à minimiser l'utilisation de couleurs désagréables avant ce seuil.

Nous avons alors choisi une valeur moyenne pour l'indice : 0.5 à 20% de couleurs désagréables sur la carte.

L'allure de la courbe de l'indice obtenue est donc celle de la Figure 81.

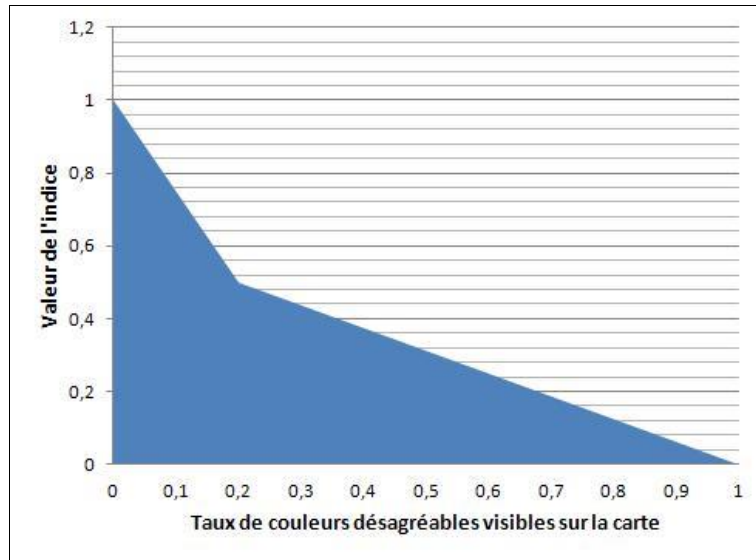


FIGURE 81 ALLURE DE LA COURBE DES VALEURS DE L'INDICE DE COULEURS DESAGREABLES

Ainsi, après avoir calculé le taux (rapport) de couleurs désagréables présentes sur la carte, l'évaluation de la valeur de cet indice se fait grâce à ces deux fonctions issues de la courbe :

- Si le taux de couleurs désagréables est inférieur ou égal à 20% alors la formule de la fonction sera la suivante :

$$iCq = -\frac{5}{2}T + 1$$

- Si le taux de couleurs désagréables est supérieur à 20% alors la formule de la fonction sera la suivante :

$$iCq = -\frac{5}{8}T + \frac{5}{8}$$

Avec :

iCq = Valeur de l'indice de quantité de couleurs désagréables

T = Taux de couleurs désagréables visibles sur la carte

L'algorithme retenu pour calculer la valeur de l'indice de quantité de couleurs désagréables s'écrit donc de la façon suivante (Algorithme 4) :

```

soit tauxVisible = indice = 0
soit couleursDesagreables = List(couleur1, couleur2, ...)

Pour chaque Couche dans Carte
    Si couleursDesagreables.contient(Couche.couleur) Alors
        tauxVisible = tauxVisible +
(calculerSurfaceVisible(Couche) / Carte.aire)
    Fin Si
Fin Pour

Si tauxVisible < 0.2 Alors
    indice = 1 - tauxVisible * 5 / 2
Sinon
    indice = 5 / 8 - 5 * tauxVisible / 8
Fin Si

```

ALGORITHME 4 ALGORITHME SIMPLIFIE DU CALCUL DE L'INDICE D'UTILISATION DE COULEURS DESAGREABLES SUR UNE CARTE

2.6. INDICE DE CONTRASTE DE COULEURS

Le manque de contraste entre les couleurs d'objets voisins peut causer des erreurs de perception de leurs couleurs, et empêcher l'identification correcte de la symbolisation d'un objet provoquant une ambiguïté de sens qui nuit à la compréhension de la carte par le lecteur. Certaines couleurs peuvent être peu visibles, déformées, ou confondues avec celles des objets voisins. Le contraste simultané (Itten 1967) peut même faire percevoir des couleurs différemment en fonction de leurs couleurs adjacentes (chapitre A.2). Des couleurs de valeurs et de teintes voisines peuvent être confondues. Un objet de plus petite surface que ses voisins, ayant une couleur proche de la leur, peut être associé à ses objets voisins. Par exemple dans la Figure 82 suivante, les bâtiments représentés en jaune clair et la végétation représentée en vert clair, ont des valeurs proches, ce qui les rend difficilement distinguables. Idem pour les couches du fond de carte et les bâtiments qui ont la même teinte et des valeurs très proches, rendant les bâtiments invisibles.

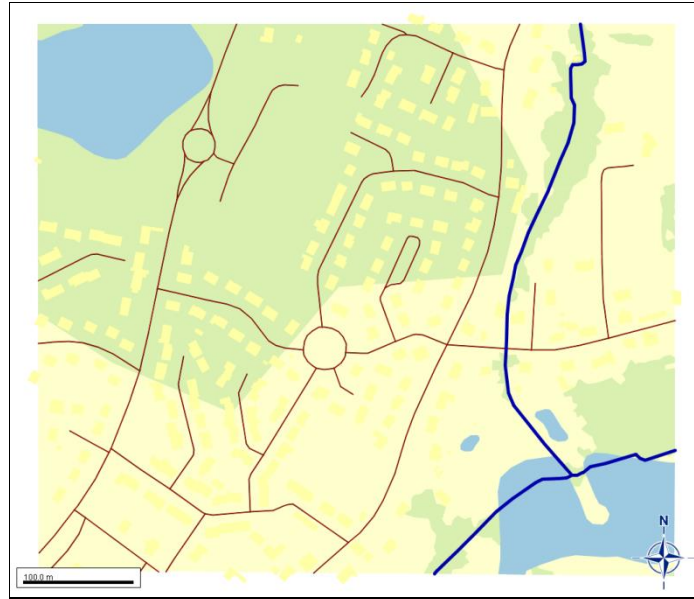


FIGURE 82 UNE CARTE PRESENTANT UN FAIBLE CONTRASTE ENTRE LES BATIMENTS ET LE FOND

Le calcul de cet indice de contraste repose sur les travaux du laboratoire COGIT dans le cadre des études sur la couleur d'Elisabeth Chesneau (Chesneau 2006) et d'Elodie Buard (Buard et al 2009). Conformément aux travaux d'Itten, deux types de contrastes ont été pris en compte : un contraste de clartés et un contraste de teintes correspondant respectivement à la distance entre deux couleurs du cercle chromatique selon les niveaux, et à une distance entre deux couleurs du cercle chromatique selon les quartiers (Figure 83).

La valeur de cet indice varie également entre 0 et 1.

Lorsque les couleurs de deux objets différents sont identiques en clarté et en teinte, alors le contraste est nul et la valeur de l'indice est égale à 0. A l'opposé, lorsque le contraste est maximal en clarté et en teinte (typiquement pour la couleur noire et la couleur blanche) alors la valeur de l'indice est maximale et égale à 1.

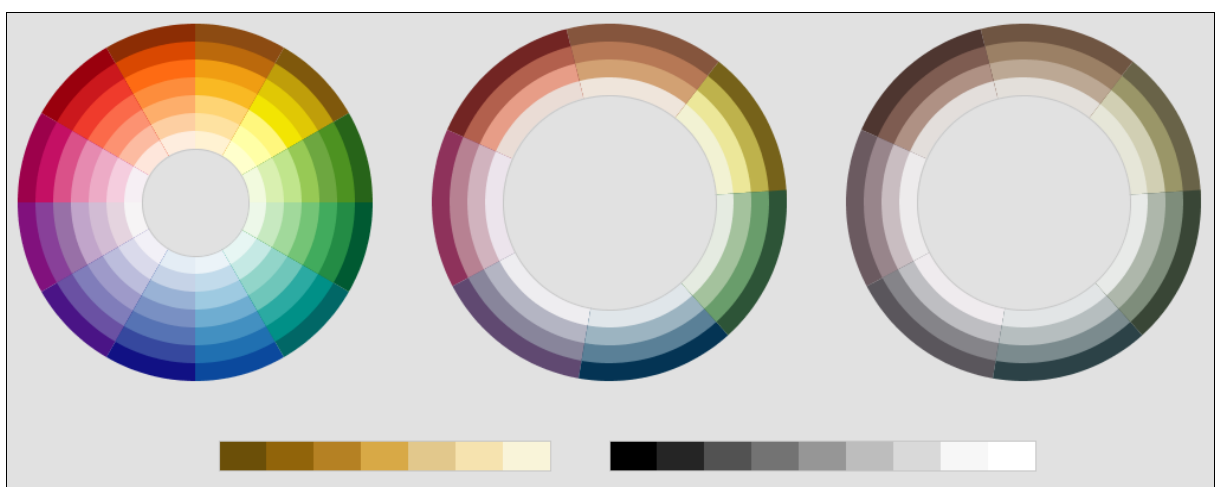


FIGURE 83 LES CERCLES CHROMATIQUES DEFINIS AU LABORATOIRE COGIT

Indice local de contraste de couleurs

L'indice local de contraste de couleurs se calcule entre couches dites voisines. Deux couches A et B sont dites voisines si elles possèdent des objets qui ont au moins une intersection ou adhérence. Si dans une base de données deux objets géographiques se touchent sans avoir d'intersections (par exemple une route qui longe un bois), au niveau des objets cartographiques et compte tenu de la largeur des symboles, on considère que les objets cartographiques sont voisins. Les deux couches (bois et route) qui contiennent ces deux objets voisins seront donc considérées comme deux couches voisines.

Ainsi, l'indice local du contraste de couleurs concerne une paire de couches et non une seule couche comme pour les autres indices. Un indice local de contraste de couleurs n'a de sens que s'il est exprimé par rapport à deux couches car la propriété adressée (contraste) est une propriété associée à une relation et non une propriété propre à une couche.

La formule qui permet de calculer l'indice de contraste entre deux couches de données voisines est donc la suivante :

$$iCc = \frac{cc + ct}{2}$$

Avec :

$iCc(A, B)$ = Valeur de l'indice de contraste de couleurs

cc = Valeur du contraste de clartés de la couche A par rapport à la couche B

ct = Valeur du contraste de teintes de la couche A par rapport à la couche B

La présence d'une bordure autour d'un ou des deux objets voisins peut aider à les distinguer si la couleur de la bordure est suffisamment contrastée avec celle des deux objets en question. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle les cartographes ajoutent des bordures aux objets surfaciques. Etant donné que la bordure est souvent représentée en noir ou du moins foncée, dans un souci de simplification, nous considérons que l'ajout d'une bordure améliore la distinction des objets.

La présence d'une bordure sera donc prise en compte dans le calcul de la manière suivante : si les objets d'au moins une des deux couches possèdent une bordure alors la valeur de l'indice de contraste est augmentée de 0.2. La valeur finale de l'indice de contraste sera plafonnée à 1.

Indice global de contraste de couleurs

L'indice de contraste global de toute la carte correspond à la moyenne des indices des contrastes de couches voisines pondérée par le périmètre d'intersection de ces couches. Ainsi le contraste entre des couches voisines sur une grande étendue est plus important que le contraste entre des couches qui n'ont qu'une petite intersection car le premier a un impact plus grand quant à la distinction des objets par le lecteur.

Dans la carte suivante par exemple (Figure 84), pour pouvoir reconnaître l'objet « cours d'eau », la qualité du contraste entre la végétation et le cours d'eau a un impact plus important que la qualité du contraste entre les bâtiments et ce même cours d'eau.

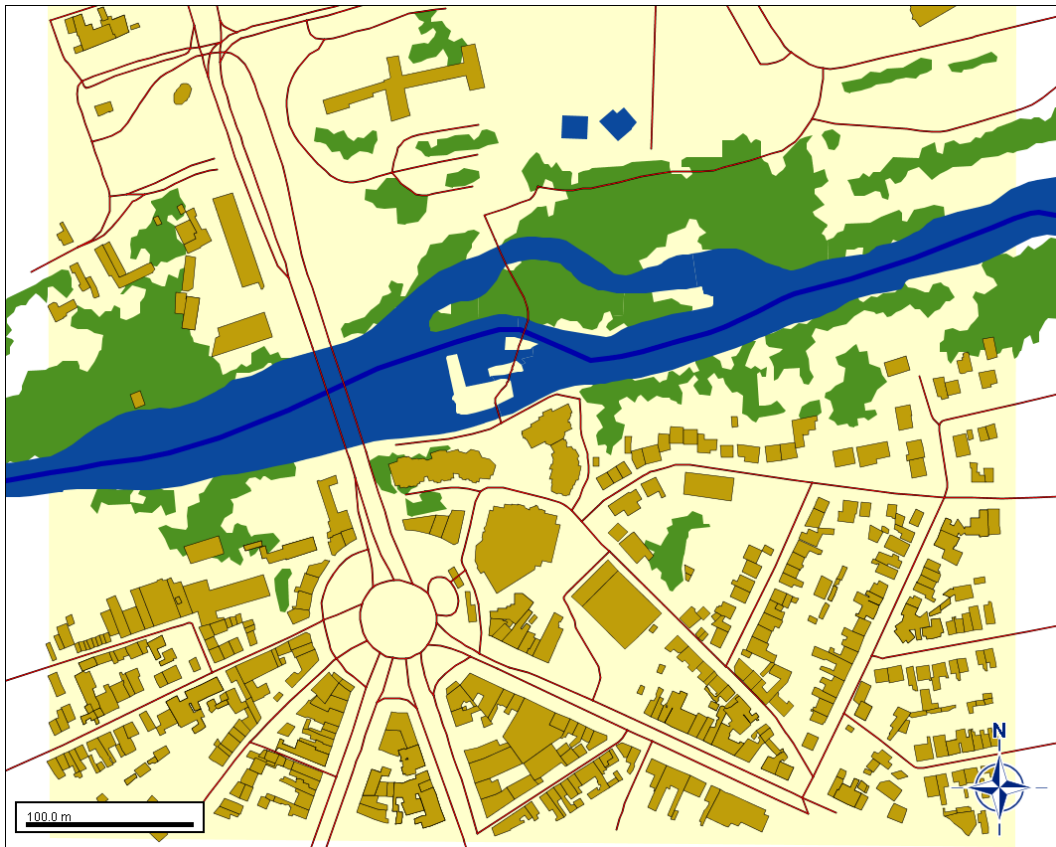


FIGURE 84 CARTE ILLUSTRANT LA QUALITE DE CONTRASTE ENTRE OBJETS VOISINS

```

soit indiceLocal = indiceGlobal = 0
soit numerateur = denominateur = 0
// intersection = tableau qui contient les indicesLocaux et
les périmètres d'intersections des couches voisines
soit intersections = Map<Nombre, Nombre>

Pour chaque Couche1 dans Carte
  Pour chaque Couche2 dans Carte autre que Couche1
    Si intersection(Couche1, Couche2).perimetre > 0 Alors
      cc = contrasteClarte(Couche1.couleur, Couche2.couleur)
      ct = contrasteTeinte(Couche1.couleur, Couche2.couleur)
      indiceLocal = (cc + ct) / 2
      Si Couche1.bordure.aire > 0 ou Couche2.bordure.aire > 0
Alors
      indiceLocal = indiceLocal + 0.2

```

```

    Fin Si
    Si indiceLocal > 1 Alors
        indiceLocal = 1
    Fin Si
    intersections.ajouter(indiceLocal, intersection(Couche1,
Couche2).perimetre)
    Fin Si
    Fin Pour
Fin Pour

Pour chaque (indiceLocal, perimetreIntersection) dans
intersections
    numerateur = numerateur + indiceLocal *
perimetreIntersection
    denominateur = denominateur + perimetreIntersection
Fin Pour

indiceGlobal = numerateur / denominateur

```

ALGORITHME 5 ALGORITHME SIMPLIFIE DU CALCUL DE L'INDICE DE CONTRASTE DANS UNE CARTE

2.7. INDICE D'ÉPAISSEUR DE BORDURE

Les résultats des tests menés (chapitre B.5) montrent que l'épaisseur de la bordure des objets cartographiques peut être un facteur déterminant pour la perception et la compréhension du sens de l'objet cartographique en question.

Dans ce qui suit, la surface d'un objet cartographique est la somme de la surface de sa bordure et celle de son « corps » qui est le symbole interne de l'objet entouré par la bordure (tel qu'expliqué en section 2.2).

Ainsi, si la surface de l'objet et celle de sa bordure ne sont pas adaptées, l'intérieur de l'objet peut ne plus être distingué (et donc reconnu), une perte de sens pourra alors survenir. Cela est d'autant plus vrai que l'objet est de petite taille.

Si l'objet n'est pas de petite taille, l'échelle de représentation de la carte est donc probablement adaptée et n'est pas la source du problème qui pourra être un mauvais choix de représentation de la bordure.

Par exemple, dans la carte qui suit (Figure 85), les objets indiqués par les flèches jaunes ne sont pas de petite taille, mais, étant donné que leur bordure a une épaisseur trop grande, il peut devenir difficile de reconnaître le thème auquel appartiennent ces objets.



FIGURE 85 UNE CARTE AYANT DES OBJETS AVEC UNE LARGE BORDURE

Cet indice se décline également en deux versions :

Indice local d'épaisseur de bordure

L'indice local traduit la situation sur une couche. Un indice local sur chaque couche de données correspond à la moyenne des rapports entre la bordure de chaque objet de la couche et la surface de cet objet (incluant la bordure). Puisque le cas extrême où la surface de la bordure est égale à la surface totale de l'objet (donc une bordure qui recouvre complètement l'objet) doit être considéré comme mauvais, la formule devrait donc être écrite de la façon suivante (1 - ratio) afin d'obtenir une valeur nulle pour l'indice de ce cas extrême.

$$iB = \frac{\sum \left(1 - \frac{\text{Surface de la bordure}}{\text{Surface de l'objet}} \right)}{\text{nombre d'objets dans la couche}}$$

Indice global d'épaisseur de bordure

L'indice global correspond à la moyenne de tous les indices locaux de toutes les couches de la carte.

L'indice varie entre 0 et 1. L'indice tend vers 0 lorsque la surface des bordures de tous les objets de la carte devient aussi grande que celles de leurs objets respectifs et les recouvrent donc totalement. L'indice sera égal à 1 si aucun des objets de la carte n'a de bordure.

```

soit indiceObjet = total = 0
soit indicesCouches = Map<Couche, Nombre>

Pour chaque Couche dans Carte
    total = 0
    Pour chaque Objet dans Couche
        indiceObjet = 1 - (Objet.bordure.aire / Objet.aire)
        total = total + indiceObjet
    Fin Pour
    indiceLocalCouche = total / Couche.nbrObjets
    indicesCouches.ajouter(Couche, indiceLocalCouche)
Fin Pour

total = 0
Pour chaque (Couche, indiceLocalCouche) dans indicesCouches
    total = total + indiceLocalCouche
Fin Pour

indiceGlobal = total / indicesCouches.taille

```

ALGORITHME 6 ALGORITHME SIMPLIFIÉ DU CALCUL DES INDICES DE BORDURE LOCAUX ET GLOBAL POUR UNE CARTE

2.8. CONCLUSION

Dans le but de pouvoir améliorer la représentation des objets cartographiques et donc la lisibilité de la carte, l'évaluation de sa représentation initiale était une étape nécessaire.

Cinq indices ont donc été définis et leurs algorithmes présentés. Chacun de ces indices avait pour but d'évaluer la visibilité des objets cartographiques présents sur la carte selon un certain critère (superposition, taille, couleurs désagréables, contraste de couleurs, et bordure).

La pertinence de ces indices est validée grâce à un test décrit au chapitre B.5 durant lequel une série de cartes ayant différentes valeurs d'indices a été présentée à des testeurs. La consigne était de choisir la carte la plus compréhensible parmi un sous-ensemble de cette série de cartes et de voir si les choix étaient cohérents avec les valeurs des indices. Les résultats sont commentés au chapitre B.5.

L'évaluation de la visibilité des objets cartographiques étant désormais satisfaisante, des techniques d'amélioration de la représentation de ces objets (et donc de leur visibilité traduite par la valeur de leurs indices) sont présentées dans la section qui suit.

3. PROPOSITION D'AMELIORATION DE LA VISIBILITE, ET SON IMPACT SUR LES INDICES DE VISIBILITE

Au chapitre précédent nous avons défini une série d'indices permettant de caractériser une carte. Une fois la carte caractérisée, on peut alors appliquer des traitements pour améliorer sa lisibilité en changeant les symbolisations ou l'ordre des couches.

Concernant les modifications de symbolisation, plusieurs peuvent être envisagées pour améliorer la visibilité des objets cartographiques. Nous avons conçu quatre algorithmes qui répondent à certains problèmes récurrents. Certains de ces indices constituent les solutions les plus simples et sont le plus souvent utilisés lorsqu'on réalise interactivement une carte, d'autres sont plus complexes car ils reposent sur la manipulation de la géométrie des objets:

- La modification de l'ordre des couches,
- La modification des couleurs,
- La modification de la taille des bordures,
- L'augmentation de la taille des surfaces.

On notera que ces solutions ne sont pas originales. Elles sont appliquées par les cartographes lors des étapes de généralisation et de symbolisation. En ce qui concerne la généralisation, il est bien connu qu'une carte mal ou trop peu généralisée est peu lisible. Nous ne traitons pas ici l'ensemble du problème de généralisation qui demande de se tourner vers des algorithmes complexes. Nous proposons ici des améliorations locales en considérant que les niveaux de détail des objets géographiques sont a priori adaptés à l'échelle de visualisation.

Nous verrons aussi par la suite que certaines opérations peuvent s'appliquer à quelques objets uniquement, à tous les objets d'une couche ou bien à l'ensemble des couches.

Les modifications appliquées à certains objets peuvent paraître étonnantes, pourtant c'est bien ce qui est fait en généralisation où, pour améliorer la lisibilité de la carte, certains objets sont déplacés et d'autres ne le sont pas. Lorsque les transformations ne sont appliquées qu'à certains objets cartographiques, la contrainte est de faire en sorte que le sens global soit préservé c'est-à-dire que les modifications n'entraînent pas d'ambiguïté d'interprétation signés.

Par ailleurs, d'autres algorithmes de convergence et de modifications pourraient être intégrés, nous en reparlerons lors des perspectives de ce travail.

3.1. REORDONNER L'ORDRE D'AFFICHAGE DES COUCHES DE DONNEES

On voudrait, par l'intermédiaire de cette modification, améliorer la valeur de l'indice de superposition en essayant de corriger les problèmes de recouvrements des objets cartographiques dus à un mauvais choix de l'ordre d'affichage des couches.

La réorganisation de cet ordre d’affichage permet d’optimiser la surface visible de chaque couche sans détériorer la visibilité des autres couches. Pour cela, nous considérons que les données sont placées sur des calques invisibles superposés pour former la carte. Trois algorithmes de réorganisation ont été retenus et testés.

Ordre selon l’objet ayant la plus grande surface dans chaque couche :

Dans ce cas, les couches sont organisées de manière à mettre sur le calque le plus bas, la couche comportant l’objet ayant la plus grande surface en comparaison avec les objets des autres couches. Et ainsi de suite jusqu’à arriver à la dernière couche qui correspond à celle dont le plus grand objet est le plus petit comparé aux plus grands objets des autres couches. Cette solution, dont l’Algorithme 7 reprend l’implémentation, montre rapidement des limites puisqu’une couche contient plusieurs objets cartographiques de tailles différentes, et l’existence d’un symbole de grande taille n’exclut pas la possibilité d’avoir sur la même couche d’autres symboles de petite taille susceptibles d’être recouverts par les couches disposées sur les calques plus hauts.

```
Fonction Algorithme7(Carte)
    Soit ordreCouche = Map<Couche, Nombre>
    Pour chaque Couche dans ListeDeCouches
        Soit surfacePlusGrandObjet = 0
        Pour chaque Objet dans Couche
            Si Objet.aire > surfacePlusGrandObjet Alors
                surfacePlusGrandObjet = Objet.aire
        Fin Si
    Fin Pour
    ordreCouche.ajouter(Couche, surfacePlusGrandObjet)
Fin Pour
ordreCouche.trier(« descendant »)
Retourner ordreCouche
Fin Algorithme7
```

ALGORITHME 7 ALGORITHME SIMPLIFIÉ DU REARRANGEMENT DES COUCHES SELON LA SURFACE DE LEURS PLUS GRANDS OBJETS RESPECTIFS

Ordre selon la surface totale de chaque couche :

Dans cet algorithme, l’ordonnancement des couches est déterminé par les surfaces totales des objets sur chacune des couches. La somme des surfaces de tous les symboles de la couche est calculée. La couche ayant la plus grande somme est placée sur le calque le plus bas, puis la couche suivante sur le calque directement au-dessus et ainsi de suite jusqu’à placer la couche qui correspond à la plus petite somme cumulée des surfaces sur le calque le plus haut.

Cette proposition est implémentée par l'Algorithme 8. De même que la proposition précédente, celle-ci présente des limites. Un cas limite est le suivant : la carte comporte deux couches, une composée de plusieurs éléments surfaciques de petites tailles et l'autre composée d'un seul élément mais de plus grande taille. En effet, si la somme des aires des éléments de la première couche est plus grande que l'aire de la seconde, alors la seconde couche sera placée au-dessus de la première engendrant alors le risque de recouvrement de plusieurs petits éléments de la première couche par le grand élément de la seconde couche.

```

Fonction Algorithme8(Carte)
    Soit ordreCouche = Map<Couche, Nombre>
    Pour chaque Couche dans ListeDeCouches
        Soit surfaceTotale = 0
        Pour chaque Objet dans Couche
            surfaceTotale = surfaceTotale + Objet.aire
        Fin Pour
        ordreCouche.ajouter(Couche, surfaceTotale)
    Fin Pour
    ordreCouche.trier(« descendant »)
    Retourner ordreCouche
Fin Algorithme8

```

ALGORITHME 8 ALGORITHME SIMPLIFIÉ DU REARRANGEMENT DES COUCHES SELON LEURS SURFACES TOTALES

Ordre selon la surface moyenne de chaque couche :

Pour cette proposition, les couches sont ordonnées selon la moyenne des surfaces des symboles composant chaque couche. Ainsi, la couche dont la surface moyenne des objets est la plus importante sera placée sur le calque le plus bas, et la couche dont la surface moyenne de ses éléments est la plus faible sera placée sur le calque le plus haut.

Cette dernière solution est la plus satisfaisante expérimentalement. Pour prendre en compte l'importance des couches, il suffit de pondérer la moyenne avec des poids relativement proches pour ne pas totalement inverser l'ordre proposé mais différencier les couches pour lesquelles les tailles moyennes sont presque identiques. Par exemple on peut affecter des poids de 1; 1,3; 1,6 et 2.

On notera qu'ici la surface est toujours calculée en prenant la surface de l'objet symbolisé. Pour calculer la surface des objets ponctuels (points, icônes, etc.) et linéaires (routes, chemins de fer, etc.), un objet vectoriel est créé comme « buffer » au-dessus du symbole en question. Ce buffer sera la fusion de l'objet et de sa bordure sous la forme d'un polygone vectoriel dont on pourra calculer la surface (voir chapitre B2.2)

```

Fonction Algorithme9(Carte)
  Soit ordreCouche = Map<Couche, Nombre>
  Pour chaque Couche dans ListeDeCouches
    Soit surfaceTotale = nombreObjets = 0
    Pour chaque Objet dans Couche
      surfaceTotale = surfaceTotale + Objet.aire
      nombreObjets = nombreObjets + 1
    Fin Pour
    ordreCouche.ajouter(Couche, surfaceTotale/Couche.nbrObjets)
  Fin Pour
  ordreCouche.trier(« descendant »)
  Retourner ordreCouche
Fin Algorithme9

```

ALGORITHME 9 ALGORITHME SIMPLIFIÉ DU REARRANGEMENT DES COUCHES SELON LA SURFACE MOYENNE DE LEURS OBJETS

Ces trois algorithmes seront ensuite utilisés conjointement pour le réarrangement des couches selon l'ordre conventionnel. Comme le montre l'algorithme 10, cet ordre conventionnel place toutes les couches de symboles ponctuels au-dessus de toutes les couches de symboles linéaires qui à leur tour sont placées au-dessus de toutes les couches de symboles surfaciques. Pour rappel toutes ces couches sont placées sur la couche « fond » qui constitue une partition de l'espace.

```

Fonction OrdreConventionnel(Carte)
  Soit couchesPonctuels = Liste<Couche>
  Soit couchesLineaires = Liste<Couche>
  Soit couchesSurfaciques = Liste<Couche>
  Pour chaque Couche dans Carte
    Si Couche.implantation = « ponctuel » Alors
      couchesPonctuels.ajouter(Couche)
    Sinon Si Couche.implantation = « lineaire » Alors
      couchesLineaires.ajouter(Couche)
    Sinon Si Couche.implantation = « surfacique » Alors
      couchesSurfaciques.ajouter(Couche)
    Fin Si
  Fin Pour
  Retourner(couchesPonctuels,couchesLineaires,couchesSurfaciques)
Fin OrdreConventionnel

```

ALGORITHME 10 ALGORITHME SIMPLIFIÉ DE LA SÉPARATION DES COUCHES SELON LEUR TYPE D'IMPLANTATION

Les algorithmes complets qui permettent de réordonner l’affichage des couches sur une carte se présentent alors sous cette forme :

```
Soit (couchesPonctuels,couchesLineaires,couchesSurfaciques) =  
OrdreConventionnel(Carte)  
  
couchesPonctuels = Algorithme7(couchesPonctuels)  
couchesLineaires = Algorithme7(couchesLineaires)  
couchesSurfaciques = Algorithme7(couchesSurfaciques)  
  
dessiner(couchesSurfaciques)  
dessiner(couchesLineaires)  
dessiner(couchesPonctuels)
```

ALGORITHME 11 ALGORITHME SIMPLIFIE DU REARRANGEMENT DES COUCHES SELON LA SURFACE DE LEURS PLUS GRANDS OBJETS RESPECTIFS AINSI QUE SELON LA NATURE DE LEURS OBJETS

```
Soit (couchesPonctuels,couchesLineaires,couchesSurfaciques) =  
OrdreConventionnel(Carte)  
  
couchesPonctuels = Algorithme8(couchesPonctuels)  
couchesLineaires = Algorithme8(couchesLineaires)  
couchesSurfaciques = Algorithme8(couchesSurfaciques)  
  
dessiner(couchesSurfaciques)  
dessiner(couchesLineaires)  
dessiner(couchesPonctuels)
```

ALGORITHME 12 ALGORITHME SIMPLIFIE DU REARRANGEMENT DES COUCHES SELON LA SURFACE TOTALE DE LEURS OBJETS RESPECTIFS AINSI QUE SELON LA NATURE DE LEURS OBJETS

```
Soit (couchesPonctuels,couchesLineaires,couchesSurfaciques) =  
OrdreConventionnel(Carte)  
  
couchesPonctuels = Algorithme9(couchesPonctuels)  
couchesLineaires = Algorithme9(couchesLineaires)  
couchesSurfaciques = Algorithme9(couchesSurfaciques)  
  
dessiner(couchesSurfaciques)  
dessiner(couchesLineaires)  
dessiner(couchesPonctuels)
```

ALGORITHME 13 ALGORITHME SIMPLIFIE DU REARRANGEMENT DES COUCHES SELON LA SURFACE MOYENNE DE LEURS OBJETS RESPECTIFS AINSI QUE SELON LA NATURE DE LEURS OBJETS

3.2. MODIFIER LA TAILLE DES BORDURES

Une des améliorations consiste à redéfinir la symbolisation de la bordure des objets linéaires ou surfaciques. Cela permet soit d'accentuer le contraste entre deux objets voisins faiblement contrastés, soit de corriger des erreurs éventuelles de perception dues à une large bordure sur des objets de petites tailles (voir Figure 86).

Deux problèmes peuvent être soulevés par une mauvaise symbolisation de la bordure :

Le premier problème survient lorsque la bordure existe mais que son épaisseur est plus fine que le seuil minimal de perception prédéfini. Dans ce premier cas, deux solutions peuvent être appliquées : (**solution 1**) soit supprimer la bordure complètement. Les symboles graphiques des objets seront alors représentés sur la carte, sans bordure (voir Algorithme 15) ; (**solution 2**) soit augmenter la taille de la bordure pour qu'elle dépasse le seuil minimal de perception et devienne alors visible par les lecteurs (voir Algorithme 16).

Le seuil minimal de perception défini plus haut pour les objets surfaciques est le suivant (la largeur d'un pixel selon la configuration utilisée dans le cadre de cette thèse est de 0.215mm) :

$$\text{Seuil minimal de perception} = (0.215 \times 3)^2 = 0.645 \text{ mm}^2 = 9 \text{ pixels}$$

Etant donné que les bordures sont de forme allongée, le seuil minimal choisi concernera l'épaisseur de ces bordures et non leur surface. Ainsi, l'épaisseur minimale en dessous de laquelle une bordure est considérée comme difficilement visible a été fixée à **3 pixels**, soit un côté du seuil minimal de perception des objets ponctuels. Une bordure de 3 pixels est donc correcte, mais à 2 pixels, elle est considérée comme un peu trop fine. On notera que cela correspond à des valeurs bien plus grandes que pour des cartes papiers (où les bordures peuvent être de 0.15mm) mais sur écran (Spiess 1993) les valeurs sont, encore de nos jours, différentes.

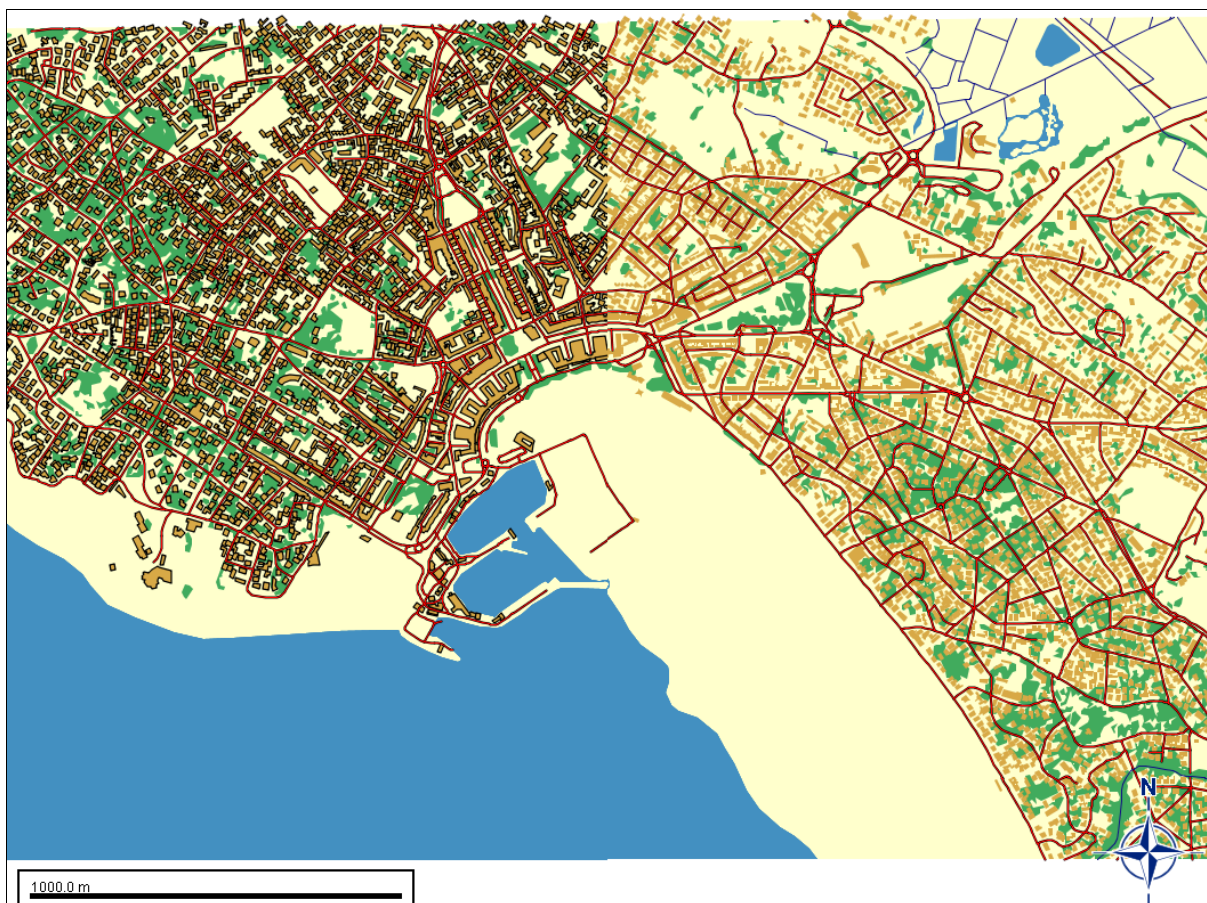


FIGURE 86 SUPPRESSION DE LA BORDURE POUR LA COUCHE BATI DANS LA PARTIE DROITE POUR ALLEGER LA CARTE

```

Soit seuilBordure = 3
Soit seuilSurfacique = 9

```

ALGORITHME 14 SEUILS MINIMAUX DE PERCEPTION UTILISES PAR LES ALGORITHMES DE 15 A 19

```

Pour chaque Couche dans Carte
    Si Couche.légende.epaisseurBordure < seuilBordure
        Couche.légende.epaisseurBordure = 0
    Fin Si
Fin Pour

```

ALGORITHME 15 ALGORITHME SIMPLIFIE QUI SUPPRIME LES BORDURES DIFFICILEMENT VISIBLES

```

Pour chaque Couche dans Carte
    Si 0 < Couche.légende.epaisseurBordure < seuilBordure
        Couche.légende.epaisseurBordure = seuilBordure + 1
    Fin Si
Fin Pour

```

ALGORITHME 16 ALGORITHME SIMPLIFIE QUI AUGMENTE L'ÉPAISSEUR DES BORDURES DIFFICILEMENT VISIBLES

Le deuxième problème survient lorsque *l'épaisseur de la bordure n'est pas adaptée à la taille de l'objet bordé*. C'est-à-dire, si la bordure couvre une grande partie du corps de cet objet de sorte que la couleur de la bordure (par défaut, noire) est plus visible que celle de l'objet, alors cette représentation est considérée comme « déséquilibrée ».

Les solutions retenues pour résoudre ce problème sont les suivantes : **(solution 1)** Diminuer la taille de la bordure si l'épaisseur de celle-ci est supérieure au seuil minimal de perception des bordures ; **(solution 2)** Si l'épaisseur de la bordure est très proche du seuil minimal de perception, alors augmenter la taille des petits objets d'un facteur de 3 pour qu'ils puissent être davantage visibles.

Dans la deuxième solution, le nombre d'objets affectés par une mauvaise représentation de la bordure influe sur la méthode d'application de la solution choisie : **(méthode 1)** Si le problème affecte un petit nombre d'objets (pas nécessairement sur la même couche), nous pouvons modifier uniquement la symbolisation de ces objets en modifiant les épaisseurs de leurs bordures. En effet, cette modification met en valeur les objets concernés sans affecter le rendu visuel global de la carte ; **(méthode 2)** Si, au contraire, le problème concerne un grand nombre d'objets, il faudra modifier l'épaisseur de bordure par défaut pour tous les objets sur la couche concernée afin de corriger le problème sans nuire à la carte dans son ensemble du point de vue de l'homogénéité de la représentation.

Nous avons donc 3 algorithmes différents (Algorithme 17, Algorithme 18, et Algorithme 19) selon la solution choisie et la méthode d'application souhaitée :

```
Pour chaque Couche dans Carte
  Si Couche.légende.epaisseurBordure > seuilBordure + 1
    Pour chaque Objet dans Couche
      Si Objet.epaisseurBordure > seuilBordure + 1
        Objet.epaisseurBordure = Objet.epaisseurBordure - 1
      Fin Si
    Fin Pour
  Fin Si
Fin Pour
```

ALGORITHME 17 ALGORITHME SIMPLIFIÉ QUI DIMINUE L'ÉPAISSEUR DES BORDURES TROP GROSSES UNIQUEMENT POUR LES OBJETS CONCERNÉS (SOLUTION 1, MÉTHODE 1)


```

Pour chaque Couche dans Carte
    Si Couche.légende.epaisseurBordure > seuilBordure + 1
        Couche.légende.epaisseurBordure =
Couche.légende.epaisseurBordure - 1
    Fin Si
Fin Pour

```

ALGORITHME 18 ALGORITHME SIMPLIFIÉ QUI DIMINUE L'ÉPAISSEUR DES BORDURES TROP GROSSES (SOLUTION 1, METHODE 2) POUR L'ENSEMBLE DES OBJETS DE LA COUCHE CONCERNÉE

```

Pour chaque Couche dans Carte
    Si Couche.légende.epaisseurBordure <= seuilBordure + 1
        Pour chaque Objet dans Couche
            Si Objet.aire < seuilSurfacique
                augmenterTaille(Objet, 3)
            Fin Si
        Fin Pour
    Fin Si
Fin Pour

```

ALGORITHME 19 ALGORITHME SIMPLIFIÉ QUI AUGMENTE LA TAILLE DES PETITS OBJETS À REPRÉSENTATION DÉSÉQUILIBRÉE (SOLUTION 2, METHODE 1)

Ces trois algorithmes ne permettent pas de résoudre tous les cas possibles. En effet, si l'objet a une forme géométrique complexe de telle sorte que la bordure recouvre une grande partie de son symbole (d'où déséquilibre), et que l'épaisseur de sa bordure est supérieure mais très proche du seuil de perception, alors aucun de ces algorithmes ne pourra s'exécuter. L'Algorithme 17 ne s'exécutera pas puisque l'épaisseur de la bordure est déjà très proche du seuil ; l'Algorithme 18 ne s'exécutera pas puisque le déséquilibre ne concerne que cet objet et non toute la couche ; l'Algorithme 19 ne s'exécutera pas non plus puisque la surface de l'objet est supérieure au seuil de visibilité des objets surfaciques.

Pour pallier cette difficulté, après l'exécution de ce processus, l'algorithme devra lister les objets sur lesquels le rapport entre la surface de l'objet et celle de sa bordure n'est pas satisfaisant, ainsi que les objets pour lesquels il n'a pas pu modifier la symbolisation de la bordure (alors que l'indicateur de bordure avait indiqué un problème sur ces objets). L'auteur de la carte pourra alors décider s'il veut ignorer le problème ou supprimer la bordure de toute cette couche et l'appliquer à une autre (pour avoir un contraste entre les deux), ou toute autre solution qu'il trouvera convenable.

3.3. MODIFIER DES COULEURS

Le processus de changement de couleur est conduit progressivement pour obtenir des contrastes plus prononcés et améliorer la perception des couleurs.

Trois étapes sont entreprises dans ce processus de changement de couleurs :

Améliorer la cohérence des couleurs avec les relations sémantiques :

Dans nos indices, nous n'avons pas proposé d'indice de cohérence signe-sens. Cela fait partie des perspectives de notre travail de thèse. Nous le décomposerions en deux indices, un qui caractériserait le fait qu'une teinte est conventionnelle ou non pour un thème (par exemple le fait de prendre une couleur verte pour le thème végétation) et un autre indice pour vérifier les relations (association, différence, ou ordre) telles que décrites dans la partie A.

S'il y a incohérence, la ou les couleurs concernées doivent être changées. Plusieurs méthodes peuvent être appliquées, l'une des plus simples consiste à remplacer la couleur qui cause cette incohérence par une autre de même clarté ou d'une clarté proche (sur le cercle chromatique) mais de teinte conventionnelle. Il devient nécessaire ici d'utiliser une base de données qui associe des teintes avec des thèmes géographiques (par exemple une famille de verts pour la végétation, une famille de bleue pour l'hydrographie, etc).

Réduire le taux de couleurs désagréables :

Si une des couleurs les plus présentes sur la carte fait partie de la liste des couleurs fortes ou désagréables (fluo, foncée, vive) alors elle est remplacée par une couleur plus acceptable.

Pour chaque famille de couleurs, le taux de surface visible de la carte avec une des couleurs de cette famille est calculé. Si cette surface est supérieure à 20% de la surface totale de la carte, cette couleur est considérée comme prédominante. Dans ce cas, une solution consiste en l'accentuation de la différence entre les valeurs actuelles des couleurs de cette famille pour les éloigner les unes des autres sur le cercle. Ensuite, l'indice de quantité de couleurs est réévalué et le processus est répété jusqu'à ce qu'on ait une distance entre les valeurs des couleurs satisfaisantes.

Ce changement modifie également l'indice de contraste des couleurs qui doit être réévalué.

Améliorer le contraste de couleurs :

Une vérification du contraste de couleurs est effectuée. Si ce contraste n'est pas suffisant pour percevoir correctement la différence entre deux couleurs, une des couleurs doit être remplacée par une autre voisine sur le cercle chromatique et appartenant à la même famille de couleurs que celle associée au thème de la couche en question. Après les changements de couleurs, une nouvelle analyse des contrastes de couleurs sera à son tour effectuée.

Si cette seconde étape donne de meilleurs résultats globaux pour le choix des couleurs (meilleure valeur de l'indice global de contrastes de couleurs), il sera validé. Sinon, la carte est remise dans l'état précédent (le dernier changement de couleur est annulé) et une seconde couleur sera modifiée pour tenter d'améliorer le contraste. Ce processus est répété jusqu'à ce que le contraste de couleurs sur la carte soit suffisant à différencier les symboles représentés (exemple en Figure 87).

Ces changements sont réalisés en même temps dans le modèle proposé selon l'algorithme 19 décrit ci-dessous. Ils modifient à la fois la valeur de l'indice de contraste de couleurs et celui de la quantité de couleur. Ainsi, il devient nécessaire de réévaluer ces deux indices afin de vérifier leurs valeurs.

Les Algorithme 20, Algorithme 21, et Algorithme 22, sont des fonctions utilitaires qui seront utilisées par l'Algorithme 23 pour pouvoir, respectivement, diminuer la saturation, augmenter la luminosité, et récupérer la liste des couleurs voisines sur le cercle chromatique. Ce sont principalement des propositions d'algorithmes qui n'ont pas été implémentés dans le prototype présenté au chapitre B.4.



FIGURE 87 EXEMPLE DE CARTE AVEC MODIFICATION DE LA COULEUR DES BATIMENTS

```

Fonction diminuerSaturation(couleur)
  Si couleur.saturation > seuilSaturationMax Alors
    couleur.saturation = seuilSaturationMax
  Fin Si
  Retourner (couleur)
Fin diminuerSaturation

```

ALGORITHME 20 ALGORITHME SIMPLIFIE QUI PERMET DE RAMENER LA SATURATION D'UNE COULEUR AU MAXIMUM AUTORISE SI CETTE SATURATION DEPASSE CE SEUIL

```

Soit teintesExclues = Liste('Noir', 'Blanc')

Fonction augmenterLuminosite(couleur)
    Si Non teintesExclues.contient(couleur.teinte) Et
    couleur.luminosite < seuilMinLuminosite Alors
        couleur.luminosite = seuilMinLuminosite
    Fin Si
    Retourner (couleur)
Fin augmenterLuminosite

```

ALGORITHME 21 ALGORITHME SIMPLIFIE QUI PERMET D'AUGMENTER LA LUMINOSITE DES OBJETS DONT LA COULEUR EST FONCEE

```

Fonction couleursVoisines(couleur, distance,
couleursConventionnelles)
    listeCouleurs = CercleChromatique.getVoisines(couleur,
distance)
    Pour chaque couleurProposee dans listeCouleurs
        Si Non couleursConventionnelles.contient(couleurProposee)
Alors
        listeCouleurs.enlever(couleurProposee)
    Fin Si
Fin Pour
    Retourner (listeCouleurs)
Fin couleursVoisines

```

ALGORITHME 22 ALGORITHME SIMPLIFIE QUI PERMET DE RETOURNER LA LISTE DES COULEURS VOISINES SUR LE CERCLE CHROMATIQUE D'UNE COULEUR INITIALE, QUI NE DEPASSENT PAS UNE DISTANCE DONNEE ET QUI FIGURENT PARMI UNE LISTE DONNEE DE COULEURS CONVENTIONNELLES

```

// Soit listeCouches = liste des couches de carte dont l'indice de contraste de couleurs ou
l'indice de couleurs désagréables est bas.

Soit ok = Faux
Pour chaque Couche dans listeCouches
    Couche.couleur = diminuerSaturation(Couche.couleur)
    Couche.couleur = augmenterLuminosite(Couche.couleur)
    Soit couleurInitiale = Couche.couleur
    couleurTheme = getCouleursConventionnelles(Couche.theme)
    couleursVoisines = couleursVoisines(Couche.couleur, 3,
couleursTheme)
    Soit possibilites = Map<Couleur, Nombre>

```

```

    Pour chaque nouvelleCouleur dans couleursVoisines
        Couche.couleur = nouvelleCouleur
        Soit indice = calculIndiceContraste(Couche)
        Si indice > seuil Alors
            ok = Vrai
            Break()
        Fin Si
        possibilites.ajouter(nouvelleCouleur, indice)
    Fin Pour
    Si ok == Faux Alors
        possibilites.trier(« descendant », 1) // tri selon le deuxième
paramètre qui est l'indice, pour récupérer le meilleur cas possible parmi ceux testés.
        Couche.couleur = possibilites.get(0, 0) //récupérer la première case
(couleur) du premier élément de la Map
    Fin Si
Fin Pour

```

ALGORITHME 23 ALGORITHME SIMPLIFIE QUI PERMET DE MODIFIER LES COULEURS D'UNE LISTE DE COUCHES QUI PRESENTENT SOIT UN CONTRASTE FAIBLE AVEC LES COUCHES VOISINES SOIT UNE FORTE PRESENCE DE COULEURS DESAGREABLES

3.4. OPTIMISER LA REPRESENTATION DES PETITS OBJETS

Cette modification concerne les objets dont la surface visible est inférieure au seuil minimal de perception ou inférieure à un seuil défini par l'auteur de la carte.

(1) L'algorithme parcourt la carte et liste les objets dont la surface visible est inférieure au seuil défini. Ensuite, pour chacun des symboles listés, un second symbole est créé dont la forme résulte de l'homothétie du symbole initial par un facteur d'agrandissement défini par l'auteur de la carte. Puis, le symbole initial est supprimé de la carte et remplacé par le nouveau symbole créé.

(2) À la suite de cet agrandissement, si deux ou plusieurs des symboles de même type modifiés se superposent, ils seront supprimés et remplacés par un troisième symbole dont la forme est celle de la fusion des objets concernés.

La mécanique appelée « fusion » se déroule en fait comme ceci (Figure 88) : les deux (ou plusieurs) objets d'une même couche qui se superposent (1) sont extraits de cette couche (ils n'en font donc plus partie). Puis un buffer précis est créé, comme expliqué en section 2.1, sur l'ensemble de ces objets qui se superposent, avec une distance égale à 0 pour que les côtés du buffer soient exactement au-dessus des côtés des objets initiaux (2).

Une fois ce buffer créé, les objets initiaux seront supprimés de la carte (3), et ce buffer sera intégré à la couche de départ pour y appliquer la légende et les règles de symbolisations spécifiques à cette couche (4).

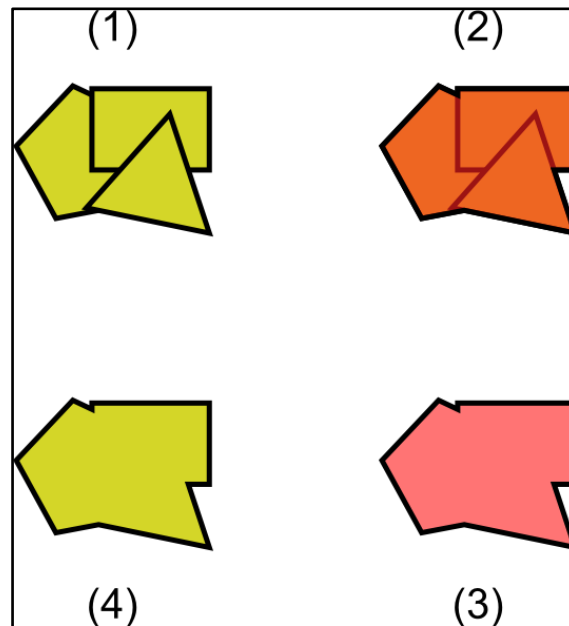


FIGURE 88 MECANISME DE FUSION DES OBJETS QUI SE SUPERPOSENT

(3) Et finalement, suite au remplacement des objets initiaux par de nouveaux objets plus grands, les symbolisations qui ont pu être modifiées par les améliorations précédentes (couleur, bordure) seront importées à partir des objets initiaux puis appliquées aux nouveaux. Si conflit il y a, par exemple fusion de deux objets dont la bordure est différente, la symbolisation du premier objet initial sera arbitrairement appliquée.

Cet algorithme peut donc être écrit de la sorte (Algorithme 24) :

```

Soit facteur = valeur-définie-par-auteur

Pour chaque Couche dans Carte
  Pour chaque Objet dans Couche
    Si Objet.aire < seuil Alors
      Soit nouveauSymbole = créer nouveau Objet()
      nouveauSymbole.forme = Objet.forme
      nouveauSymbole.forme = homothétie(Objet.aire, facteur)
      nouveauSymbole.epaisseurBordure = Objet.epaisseurBordure
      nouveauSymbole.couleur = Objet.couleur
      Couche.supprimer(Objet)
      Couche.ajouter(nouveauSymbole)
  Fin Si

```

```

    Fin Pour
Fin Pour

Soit superposition = vrai
Tant Que superposition
    superposition = faux
    Pour chaque Couche dans Carte
        Pour chaque Objet dans Couche
            Soit voisins = Objet.getListeVoisins()
            Pour chaque voisin dans voisins
                Si superposition(Objet, voisin) Alors
                    Soit nouveauSymbole = créer nouveau Objet()
                    nouveauSymbole.forme = fusion(Objet, voisin)
                    nouveauSymbole.epaisseurBordure =
Objet.epaisseurBordure
                    nouveauSymbole.couleur = Objet.couleur
                    Couche.supprimer(Objet)
                    Couche.supprimer(voisin)
                    Couche.ajouter(nouveauSymbole)
                    superposition = vrai
                    sortirPour()//l'équivalent de break dans les
langages de programmation
                Fin Si
            Fin Pour
        Fin Pour
    Fin Pour
Fin Tant Que

```

ALGORITHME 24 ALGORITHME SIMPLIFIÉ QUI AUGMENTE LA TAILLE ET ÉVENTUELLEMENT FUSIONNE LES OBJETS DE PETITE TAILLE

Dans la section qui suit, la méthode de génération de ces légendes et donc de cartes améliorées sera présentée, ainsi que la méthode de stockage sur disque des informations sur ces cartes.

3.5. PROPOSITION D'UN ALGORITHME DE GÉNÉRATION DE CARTES AMÉLIORÉES

Suite à ces différentes techniques de modifications de la symbolisation des objets cartographiques, nous proposons un algorithme d'amélioration de cartes qui applique une suite de contrôles fondés sur les indices de visibilité, puis applique des améliorations en utilisant les algorithmes présentés précédemment (de 3.1 à 3.4). Cet algorithme

d'amélioration génère donc plusieurs solutions (cartes redessinées). Il demande ensuite l'intervention de l'utilisateur pour choisir la solution qui répond le mieux à ses attentes parmi celles proposées. L'algorithme répète alors cette itération (voir Figure 89).

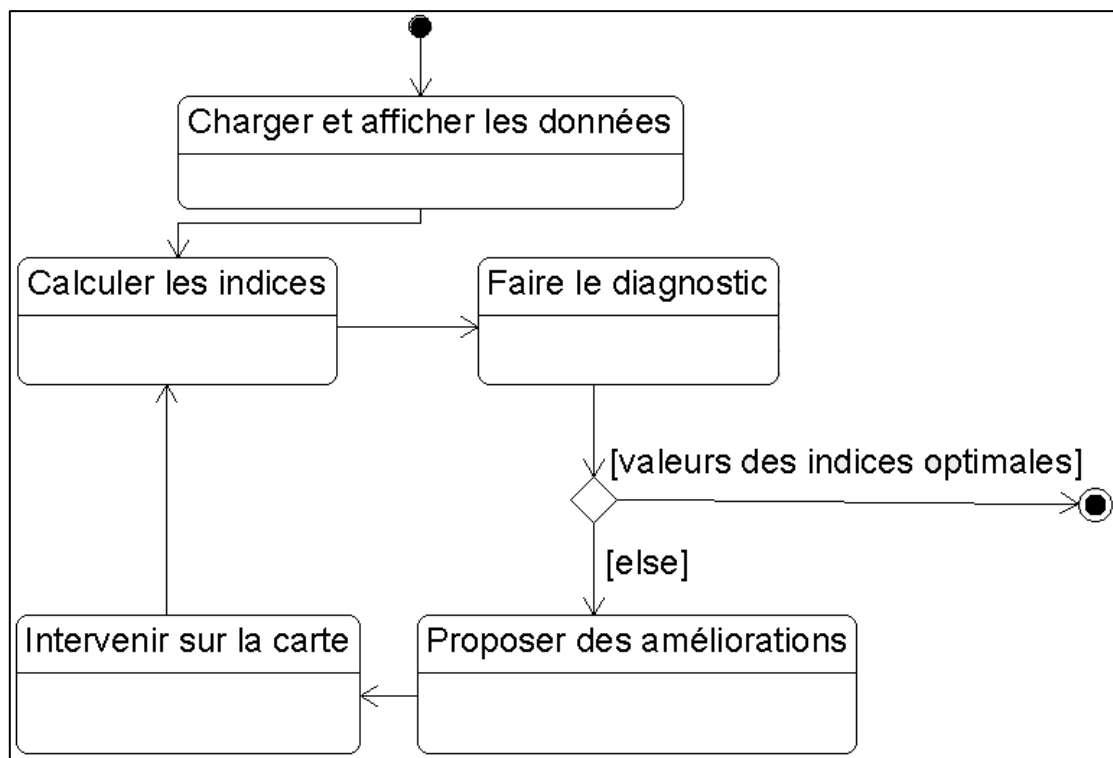


FIGURE 89 DIAGRAMME D'ETAT-TRANSITION DU PROCESSUS D'AMELIORATION DE LA CARTE

La condition d'arrêt de l'algorithme peut être atteinte sous deux conditions :

- L'utilisateur estime que la carte choisie est celle qu'il désire garder, et interrompt donc le processus.
- L'algorithme estime qu'il n'est plus possible d'améliorer la valeur des indices de visibilité et demande alors à l'utilisateur de choisir une carte parmi celles qui ont les valeurs des indices les plus hautes.

Pour converger vers une bonne solution, différentes approches sont possibles. On choisit d'adopter une démarche récursive. Cette démarche consiste à essayer d'améliorer progressivement la carte pour tendre vers des valeurs d'indices maximales. On se focalise sur un problème particulier qu'on résout, puis on passe à un autre problème qu'on résout, et ainsi de suite. Cependant, l'amélioration d'une composante peut détériorer une situation réglée auparavant. C'est pourquoi l'algorithme élimine d'office les cartes générées mais qui ont des valeurs d'indices plus faibles que celles des cartes précédentes. Cette méthode ne garantit pas la convergence optimale (des valeurs maximales pour tous les indices) mais elle est simple à mettre en œuvre. La spécificité de la recherche de solution dans notre cas est qu'on ne cherche pas la bonne solution mais que l'on cherche à améliorer une solution initiale. Il existe en effet

un grand nombre de bonnes cartes, il s'agit ici de garder les choix initiaux du concepteur de cartes et de corriger les défauts majeurs.

Pour choisir un bon état suivant, différentes stratégies sont possibles :

- Soit à base de règles : on dispose d'assez de connaissances pour savoir quelle est la solution optimale devant être appliquée, compte tenu de l'ensemble des valeurs d'indices dont on dispose ;
- Soit à base de fonction de coût : on ne dispose d'aucune information qui permette de guider le système. On essaye donc différentes solutions possibles et on choisit la meilleure par rapport aux indices ;
- Soit on mixte ces deux méthodes : certaines connaissances nous permettent de réduire l'espace de solutions à tester. On en teste certaines et on choisit la meilleure grâce à une fonction de coût sur les indices.

Nous proposons de suivre une approche interactive qui s'inspire de cette dernière approche. Lorsqu'une carte est évaluée et que les indices montrent des imperfections, nous appliquons des modifications de symbolisation en fonction des connaissances que nous avons, puis nous proposons les cartes obtenues à l'utilisateur. Celui-ci choisit une des solutions et le processus est réitéré. À savoir, les indices sont recalculés, des cartes améliorées sont générées, et l'utilisateur aura à choisir parmi ces cartes. Le processus est fini lorsqu'il n'est plus possible d'améliorer simultanément tous les indices, ou lorsque l'utilisateur aura choisi une des cartes proposées comme carte finale.

3.6. ALGORITHME DE GENERATION DE CARTES POUR LES TESTS

Cet algorithme permet à partir d'une carte initiale, de détecter les problèmes de visibilité présents dans la carte et de proposer une série de cartes améliorées.

Cet algorithme sera utilisé lors de la préparation des tests chapitre B.5 afin de générer un ensemble de cartes à partir desquelles les testeurs pourront choisir celles qu'ils préfèrent. Il ne s'agit donc pas de l'algorithme de convergence.

L'algorithme est composé de plusieurs étapes dont chacune apporte des modifications sur la géométrie des objets, l'ordre des couches de données, la couleur des thèmes, et la variation des bordures.

Pour chaque carte, l'algorithme sauvegarde d'abord la carte initiale, calcule et enregistre les valeurs de ses indices, et sauvegarde la symbolisation (le SLD) associée.

À la première étape il vérifie et corrige si nécessaire l'ordre des couches en s'assurant que les objets d'implantation ponctuelle sont au-dessus de ceux d'implantation linéaire qui sont eux-mêmes au-dessus de ceux d'implantation surfacique.

À la deuxième étape, l'algorithme identifie les objets de petites tailles, les dilate pour dépasser le seuil de distinction des objets, et si deux ou plusieurs de ces objets se superposent suite à cette dilation, il les fusionne pour ne plus faire qu'un seul objet visible.

Suite à cela, deux méthodes ont été utilisées pour générer des couleurs et des largeurs de bordures différentes :

- Priorité à la bordure : génération de cartes améliorées en faisant varier le seuil de la bordure des objets (27 cartes générées)
- Priorité à la couleur : génération de cartes améliorées en faisant varier les couleurs des objets (54 cartes générées)

Si on choisit le mode avec « **priorité à la bordure** » l'algorithme commencera par faire varier l'épaisseur de la bordure entre 0 et 1.2 mm avec un pas de 0.3. Et pour chacune de ces épaisseurs, l'algorithme modifiera les couleurs qui présentent des imperfections (couleurs désagréables, faible contraste entre deux thèmes dont les objets sont voisins) en ne changeant qu'une seule couleur à chaque itération.

Si on choisit le mode avec « **priorité à la couleur** », l'algorithme modifiera d'abord les couleurs en proposant pour chaque couleur présentant des imperfections, 4 couleurs voisines sur le cercle chromatique, et si la couleur présentant des imperfections est grisée, l'algorithme changera d'abord l'ensemble des couleurs disponibles en présentant un cercle avec une meilleure saturation puis proposera des couleurs alternatives. Suite à cela, pour chaque couleur proposée, l'algorithme générera 3 largeurs de bordure différentes : 0, 0.3 et 0.6 mm.

Finalement pour chacune des combinaisons obtenues, l'algorithme génère des cartes avec trois largeurs de routes différentes.

Pour chaque couple de (jeu de données, SLD présentant des problèmes), les cartes générées, les symbolisation (SLD) associées ainsi que les valeurs des indices sont enregistrés au fur et à mesure dans un dossier différent de ceux des autres couples (jeu de données, SLD).

Les cartes seront enregistrées au format PNG. Les SLD seront enregistrés au format XML. Et les valeurs des indices seront enregistrées au format XML en respectant le DTD²⁸ suivant :

```
<!ELEMENT carte (indice+)>
<!ELEMENT indice EMPTY>
<!ATTLIST indice
    type (bordure|superposition|taille|couleurs-
désagréables|contraste) #REQUIRED
    valeur CDATA #REQUIRED>
```

²⁸ DTD (Document Type Definition) est un document permettant de décrire un modèle de document SGML ou XML (définition Wikipédia).

Exemple d'un fichier contenant les valeurs des indices d'une carte géographique:

```
<carte>
  <indice type="bordure" valeur="0.1" />
  <indice type="superposition" valeur="0.54" />
  <indice type="taille" valeur="0.876" />
  <indice type="couleurs désagréables" valeur="0.1" />
  <indice type="contraste" valeur="0.375" />
</carte>
```

Finalement pour chaque couple de jeu de données et de sld, nous choisissons (manuellement) un sous-ensemble de cartes générées avec une sémiologie correcte, et nous présentons ces cartes aux testeurs pour qu'ils choisissent les 3 qu'ils considèrent comme étant les meilleures (les plus compréhensibles et agréables à lire).

Exemple : dans un des tests, nous présentons aux testeurs la carte suivante (Figure 90) comme carte initiale. Puis nous générons un ensemble de cartes améliorées (quelques exemples en Figure 91) que nous présentons aux testeurs également.

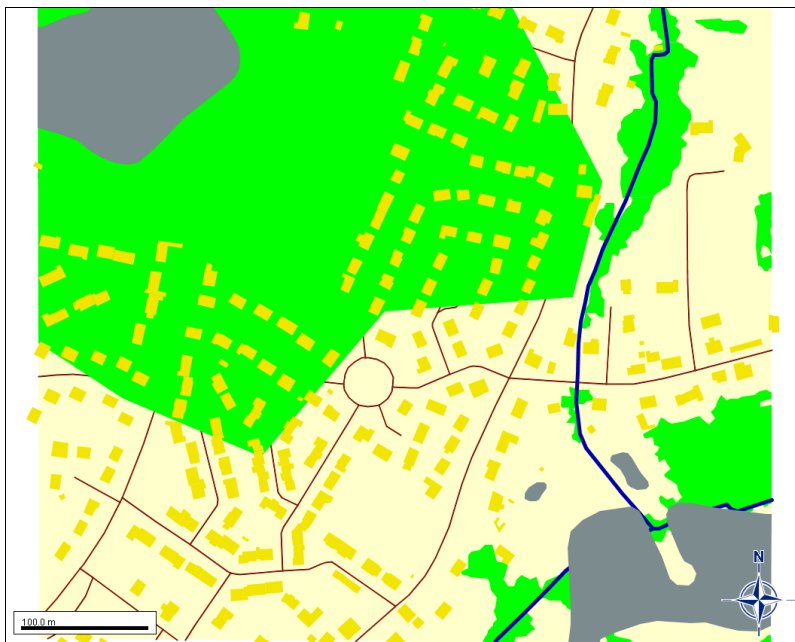


FIGURE 90 EXEMPLE DE CARTE INITIALE

Les valeurs des indices de cette carte initiale sont les suivantes :

- Indice de bordure : 0.94
- Indice de superposition : 0.34
- Indice de taille : 0.87
- Indice de couleurs désagréables : 0.19
- Indice de contraste de couleurs : 0.31

Le premier problème qui saute aux yeux est la grande quantité de couleurs vives et fluo (vert et jaune). Le second est le faible contraste de couleurs entre la couche des bâtiments et celle du fond. Le troisième problème est le mauvais ordre des couches, des couches surfaciques sont représentées au-dessus de couches linéaires (la couche « végétation » se superpose à la couche « route », la couche « lac » se superpose à la couche « cours d'eau »).

L'algorithme de génération de cartes améliorées corrige en premier ce problème de superposition puis crée un ensemble de cartes en variant les couleurs des symboles ainsi que l'épaisseur des bordures des bâtiments et l'épaisseur des signes linéaires qui représentent les routes.

Nous obtenons alors un ensemble de cartes modifiées dont quelques-unes ont été choisies pour être intégrées à nos tests.



Indice bordure: 1
Indice superposition: 0.54
Indice taille: 0.87
Indice couleurs désagréables: 1
Indice contraste de couleurs : 0.37



Indice bordure: 0.73
Indice superposition: 0.54
Indice taille: 0.87
Indice couleurs désagréables: 1
Indice contraste de couleurs : 0.4

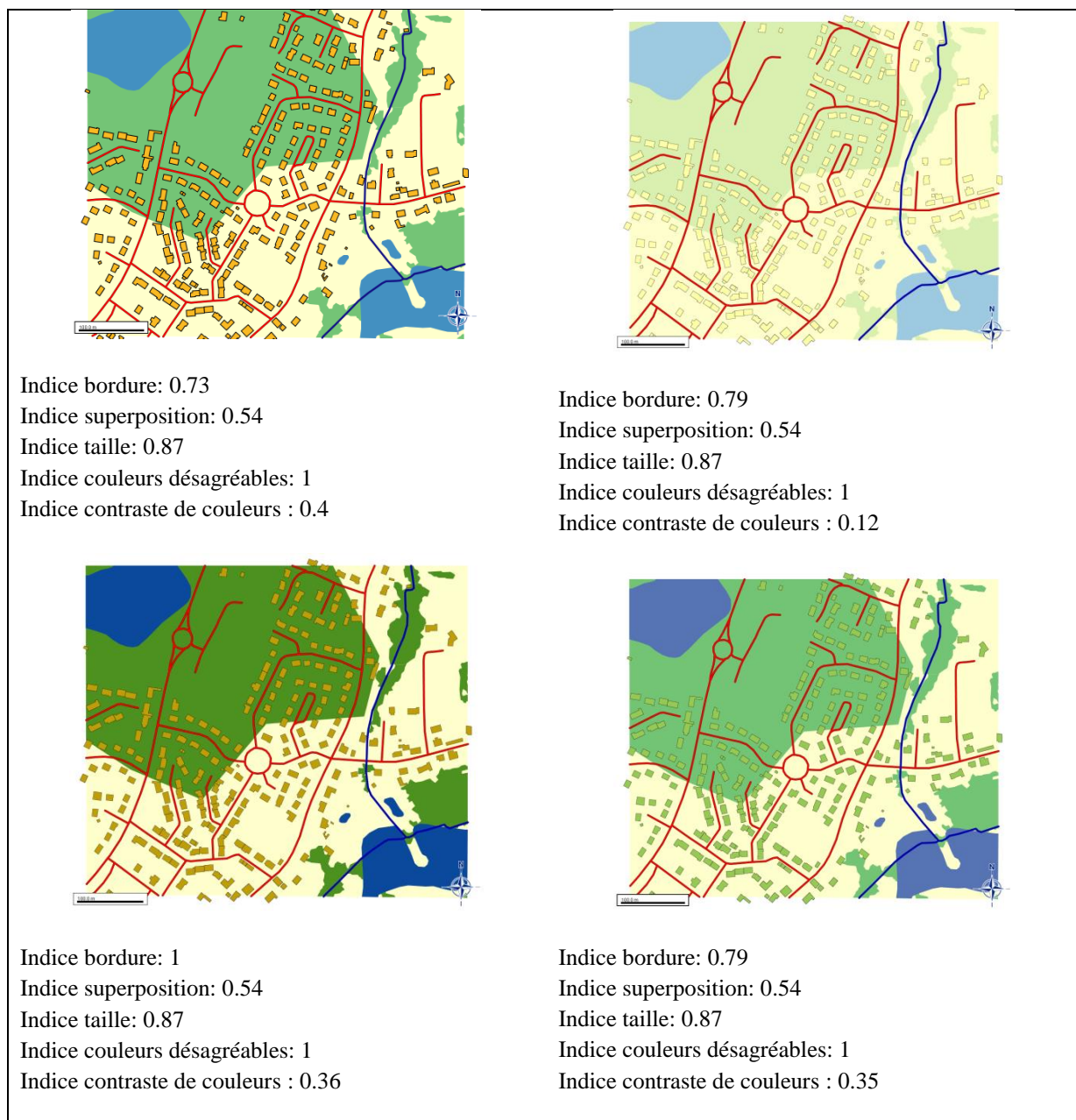


FIGURE 91 EXTRAIT DE CARTES GENEREES A PARTIR DE LA CARTE INITIALE DE LA FIGURE 88

3.7. CONCLUSION

Nous avons vu dans les pages précédentes comment le modèle décompose la notion de visibilité des objets cartographiques en un ensemble de 5 indices de visibilité et comment il calcule la valeur de chacun de ces 5 indices.

Puis nous avons vu comment ce modèle agit sur la représentation de ces objets cartographiques grâce à 4 méthodes d'améliorations afin d'avoir de meilleures valeurs d'indices et donc une meilleure visibilité de l'ensemble des objets de la carte.

Le schéma suivant (Figure 92) fait une récapitulation de ces cinq indices et ces quatre méthodes d'amélioration et montre (flèches de droite à gauche) l'impact de chaque méthode de modification de symbolisation sur les indices de visibilité.

Ainsi, l'exécution d'une méthode de modification de symbolisation (proposition d'amélioration) peut modifier la valeur de plus d'un indice de visibilité.

Dans les deux chapitres suivants, B.4 et B.5, le prototype développé qui repose sur ce modèle sera présenté, puis les tests de validation menés seront aussi expliqués.

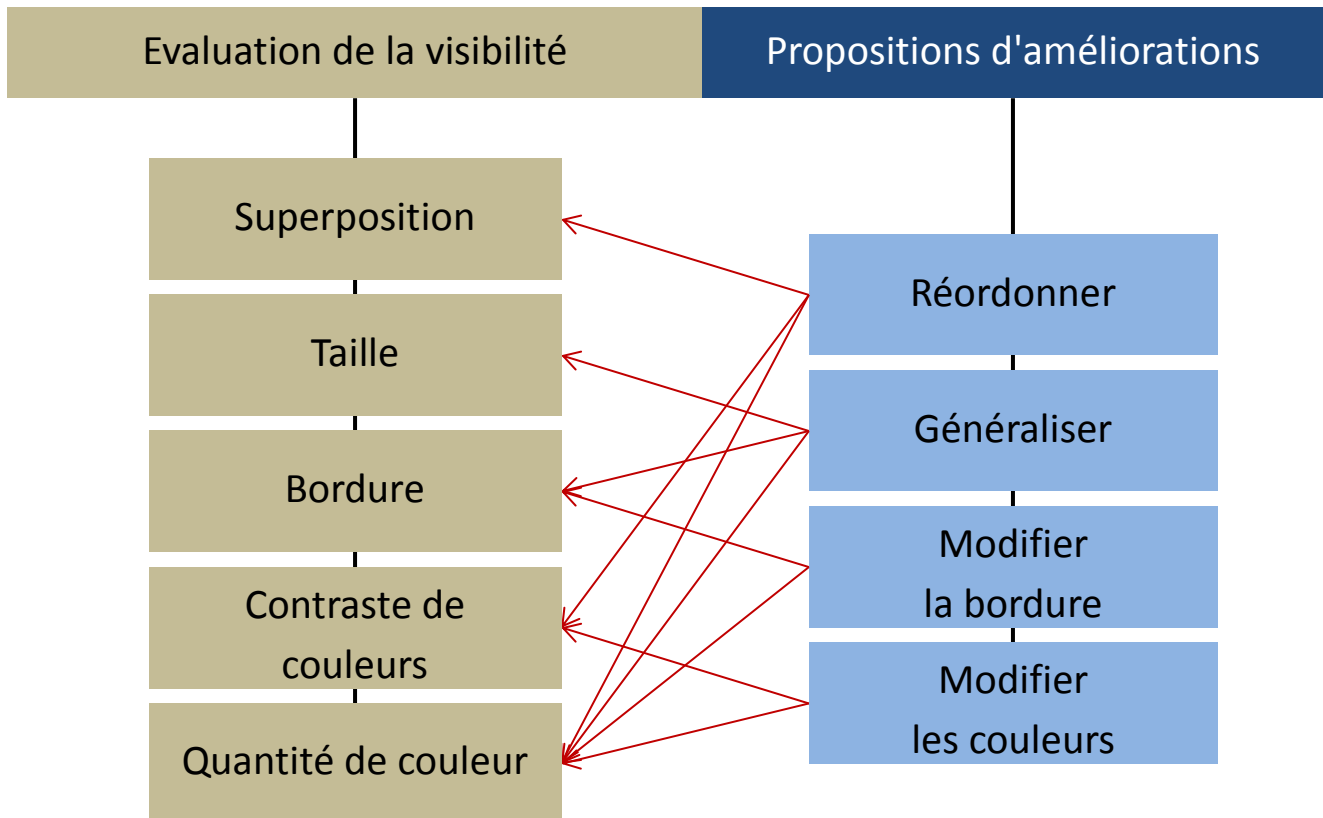


FIGURE 92 INFLUENCE DES METHODES D'AMELIORATIONS SUR LES INDICES

4. MISE EN ŒUVRE DU MODELE : LE PROTOTYPE

Dans cette section, l'outil IndiceApplication implémenté selon le modèle expliqué jusqu'ici sera présenté. Les différents Framework utilisés et les choix techniques réalisés lors de l'implémentation de cet outil seront également introduits.

4.1. OUTILS EXTERNES

PostgreSQL/PostGIS

PostgreSQL est un système de gestion de bases de données libre. Ses atouts principaux sont sa conformité avec les standards SQL d'un côté, et la possibilité de travailler sur des données volumineuses de l'autre. Les bases de données géographiques ayant la particularité d'être relativement volumineuses, PostgreSQL est donc naturellement retenu pour stocker les informations dont nous avons besoin au laboratoire COGIT.

PostGIS est un plugin qui se greffe sur PostgreSQL et qui lui permet de stocker et manipuler des données spatiales. Grâce à PostGIS, il devient facile de réaliser des opérations courantes comme la fusion ou l'intersection d'objets graphiques.

Ici, les données sont importées et stockées sous PostGIS à partir de fichiers au format standard ShapeFile. Les ShapeFile sont des fichiers qui contiennent des données décrivant la géométrie d'objets graphiques, les coordonnées de points, lignes et polygones. Ils permettent donc de stocker les informations cartographiques de façon centralisée et portable et sont donc facilement manipulables par les SIG ou lors de leur import dans une base de données comme c'est le cas ici.

GeOxygene

GeOxygene est un logiciel libre développé depuis 2002 au laboratoire COGIT de l'IGN. Il est écrit en Java et se présente comme une plateforme qui fournit plusieurs outils (en particulier le modèle de légende,) pouvant être réutilisés afin d'implémenter de nouvelles fonctionnalités de gestion de données géographiques.

GeOxygene est l'élément principal sur lequel est construit ce travail car il facilite la manipulation des données géographiques stockées dans la base PostGIS ainsi que la manipulation des symboles graphiques qui constituent la représentation visuelle de ces données géographiques.

GeOxygene peut importer les données stockées sous PostGIS grâce à OJB. OJB est une librairie opensource (Foundation Apache) qui permet de faire le mapping (conversion) entre des tables SQL et des objets Java. Les objets Java doivent avoir des paramètres qui correspondent en type aux colonnes SQL, et OJB permet d'importer des tables et remplir ces paramètres, ou à l'inverse, de lire les objets Java et de les exporter pour les enregistrer dans les tables SQL.

Les principales fonctionnalités de GeOxygene réutilisées par IndiceApplication sont :

- Le chargement et l’affichage de données cartographiques,
- Les opérations sur les objets vectoriels (calcul de base de surface, fusion, dilatation, etc.),
- Les opérations sur les couleurs (calcul de contrastes, calcul de distance entre deux couleurs, modification de couleurs).

Frameworks et autres outils utilisés

Conjointement à GeOxygene, une librairie libre de calcul de surfaces, JTS Topology Suite, a été utilisée. Développée en Java (et portée dans d’autres langages), JTS facilite la manipulation d’objets vectoriels simples et permet de réaliser les différentes opérations de base, comme la fusion ou la différence de deux ou plusieurs objets vectoriels, le calcul de surface, ainsi que la création de buffers sur des symboles. L’un des principaux avantages de JTS est que cette librairie est capable de réaliser ces opérations rapidement. En effet, avec un jeu de données de quelques centaines d’objets, la performance des outils utilisés est un facteur critique. Il n’est pas concevable que l’exécution d’une opération soit mesurée en minutes.

Le logiciel IndiceApplication utilise le framework JFreeChart afin de représenter de manière graphique les différentes valeurs des indices calculées pour une carte donnée. JFreeChart est un ensemble d’outils en Java qui permettent de dessiner des graphes et des diagrammes (histogrammes, camemberts, etc.). Sa prise en main simplifiée permet de lui déléguer cette dernière tâche sans rajouter une nouvelle couche de complexité au système.

Les tests mis en place pour valider notre modèle ont été présentés sur un site web local dont chacune des pages comporte une question différente du test. Les réponses des testeurs ont été sauvegardées dans une base MySql puis exportées dans un fichier CSV. Le site web a été développé en PHP et JavaScript. Ces langages et outils ont été choisis car ils sont simples d’utilisation et surtout faciles et rapides à mettre en œuvre. Le matériel nécessaire à un test (site web avec les questions adéquates) peut être installé en moins d’une heure et une session de test peut commencer tout de suite après. L’export des réponses des testeurs peut être fait instantanément, et leur analyse peut commencer immédiatement après le test.

4.2. L’OUTIL INDICEAPPLICATION

Comme mentionné plus haut, l’outil IndiceApplication développé pour réaliser le processus d’évaluation et d’amélioration de la visibilité des objets graphiques sur une carte est développé sur le framework libre GeOxygene, l’ensemble (GeOxygene et IndiceApplication) étant développé en Java. L’application se présente sous la forme d’une fenêtre principale (voir Figure 93) avec des menus et peut inclure différentes autres fenêtres internes.

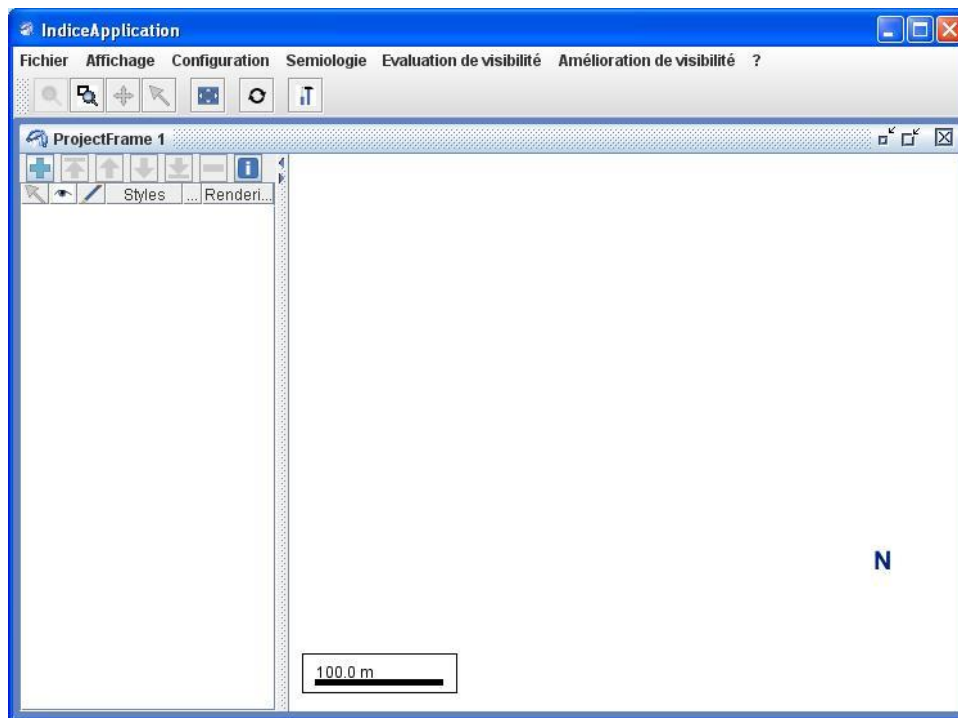


FIGURE 93 INTERFACE DE L'OUTIL INDICEAPPLICATION

Une étape de chargement de données par l'utilisateur précède naturellement toute évaluation de visibilité des objets cartographiques.

Le scénario classique qui précède l'utilisation d'IndiceApplication se déroule comme suit : (1) les données sont d'abord importées à partir de fichiers ShapeFile et enregistrées sur une base géographique sous PostGIS ; (2) ces données sont ensuite importées dans GeOxygene grâce à l'OJB et sont représentées sous formes de classes Java ; (3) ces classes sont utilisées par le moteur de rendu de GeOxygene qui affiche, dans la fenêtre de droite de l'interface graphique (Figure 93), ces mêmes données sous formes de symboles avec une représentation graphique par défaut ; (4) et finalement, l'auteur de la carte peut apporter des modifications aux représentations des symboles graphiques pour personnaliser sa carte.

Suite à cela, IndiceApplication prend le relais. Il devient alors possible d'évaluer des indices de visibilité, un par un ou tous en même temps (Figure 94). Les menus *Bordure – Surface visible – Quantité de couleurs – Contraste de couleurs – Tailles des objets* exécutent respectivement l'évaluation des indices de bordure, de surface visible, de quantité de couleurs, de contraste de couleurs, et de tailles.

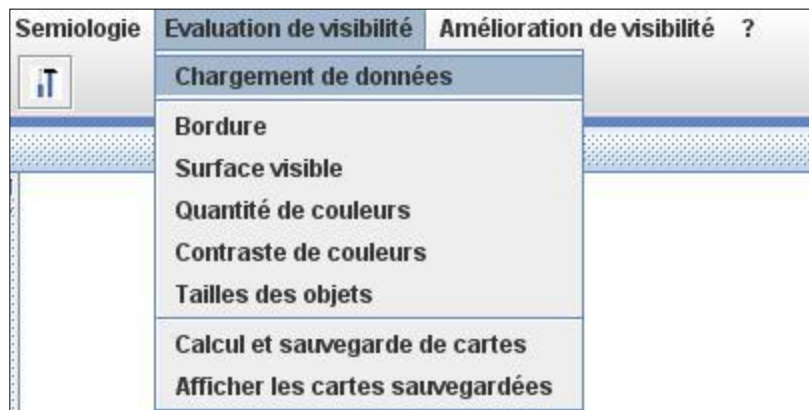


FIGURE 94 MENU DU CHARGEMENT DES DONNEES ET DE L'EVALUATION DE LA VISIBILITE

À l'issue de ce calcul, les résultats seront affichés sous forme graphique dans la fenêtre du logiciel, ils seront également listés sous forme de texte dans la console Java pour une lecture directe. Le menu *Calcul et sauvegarde de cartes* exécute l'évaluation de tous les indices en même temps puis sauvegarde la carte étudiée et les résultats des calculs dans une base de données pour pouvoir constituer un historique. Finalement, le menu *Afficher les cartes sauvegardées* permet simplement d'afficher les cartes précédemment étudiées ainsi que les valeurs de leurs indices (Figure 95).

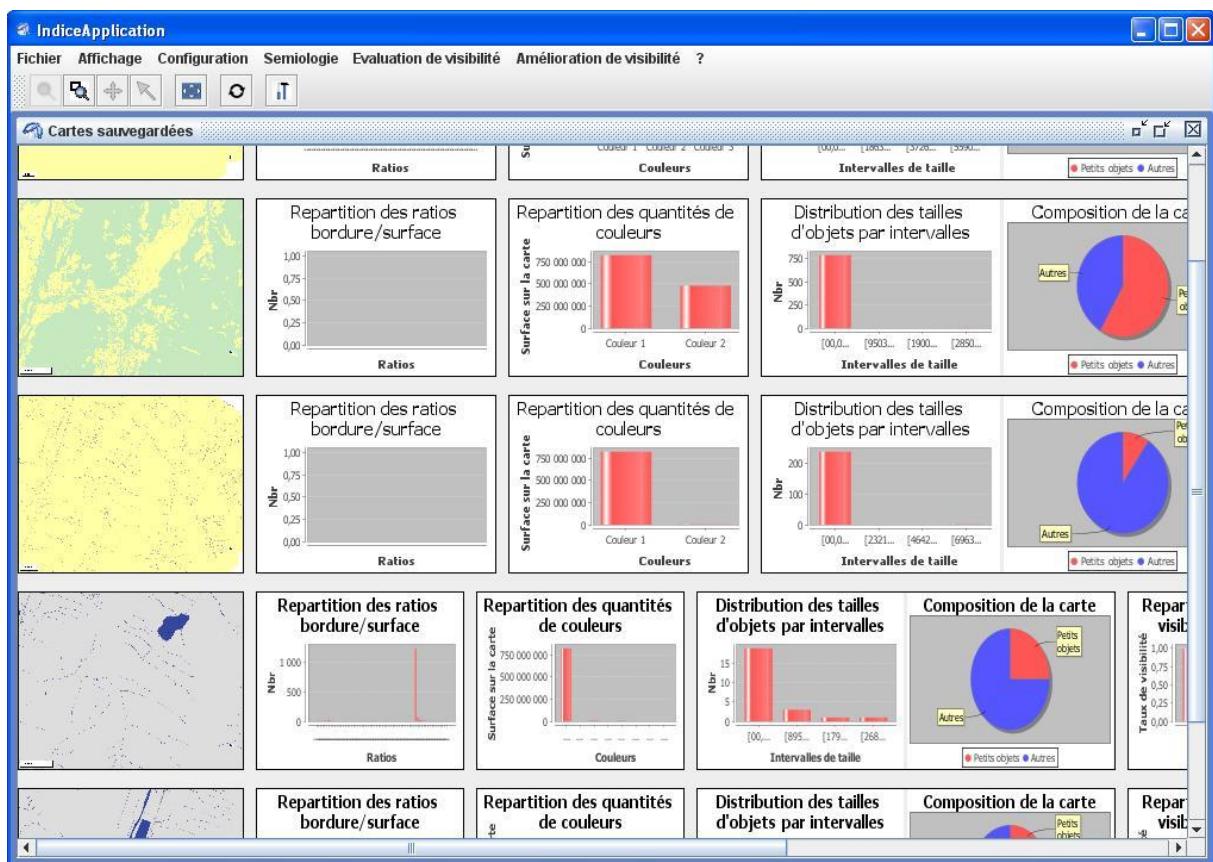


FIGURE 95 HISTORIQUE D'EXECUTION D'INDICEAPPLICATION AVEC LES CARTES EVALUEES AINSI QUE LES INDICES DE VISIBILITE CALCULES ET REPRESENTES SOUS FORME GRAPHIQUE

Après avoir calculé les valeurs des indices il devient désormais possible d'apporter des éventuelles modifications graphiques afin d'améliorer la visibilité des objets affichés sur l'écran.

4.3. MODELISATION

Le Framework GeOxygene est composé de plusieurs modules eux-mêmes composés d'un ou de plusieurs packages. Parmi les packages utilisés se trouvent ceux qui concernent la carte et sa légende : **mapContent**, **legendContent**, etc. L'outil d'évaluation de la visibilité possède quant à lui son propre package **semiologie.visibility**

Modèle de la légende

Le modèle des objets carte, légende et métadonnées et leurs relations, tels qu'ils sont implémentés dans GeOxygene, sont représentés dans la Figure 96 suivante.

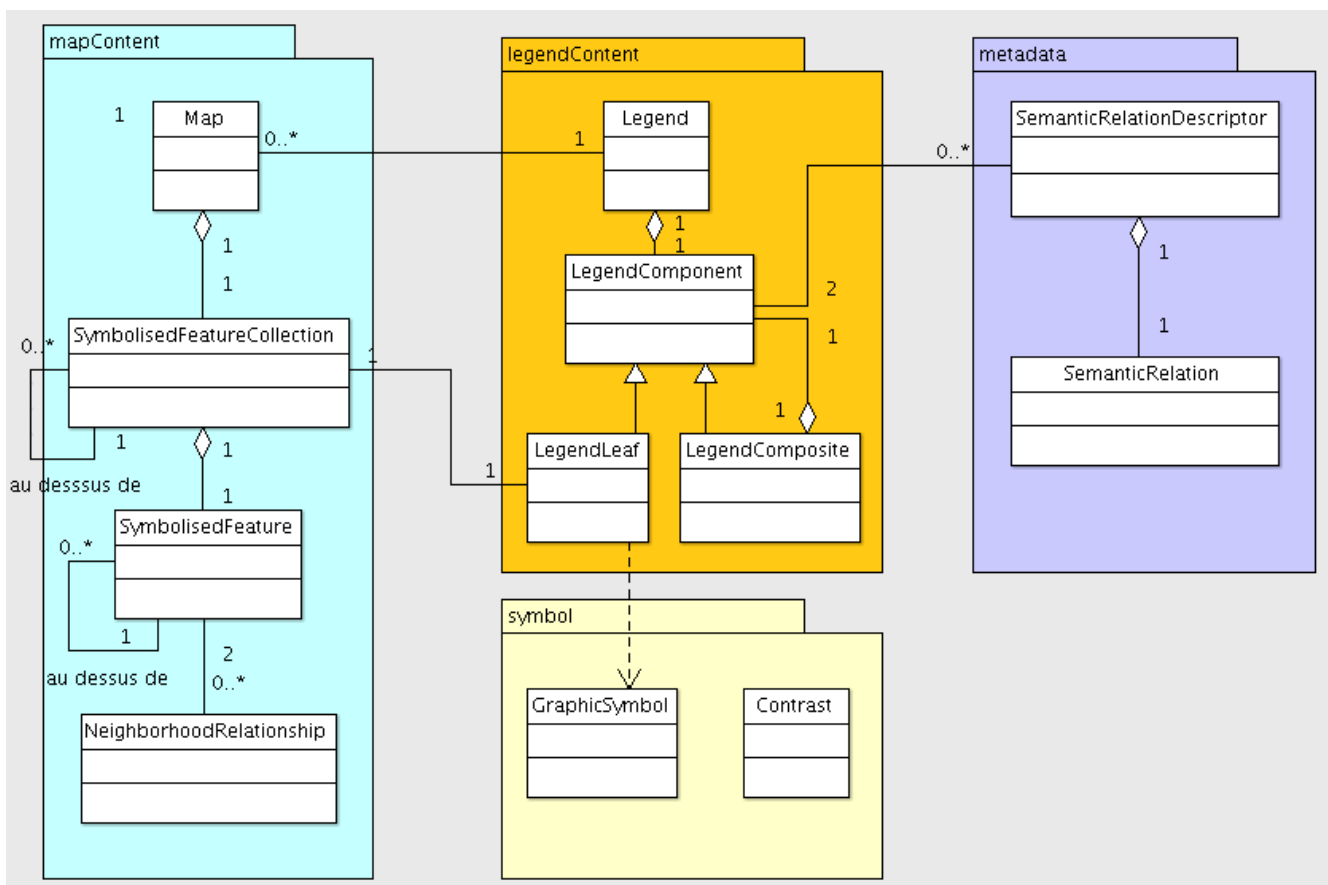


FIGURE 96 MODELE DE LA LEGENDE TEL QUE DEFINI DANS GEOXYGENE

L'objet **Map** correspond à une carte rassemblant la symbolisation des données géographiques importées selon une légende donnée. L'objet **Map** est ensuite affiché dans l'interface graphique de l'application dans une fenêtre interne de type **ProjectFrame**.

La légende est composée de thèmes (**LegendComposite**) et de lignes de légende (**LegendLeaf**). Un thème est lui-même composé soit de lignes de légendes directement, soit de sous-thèmes eux-mêmes composés de lignes de légende ou d'autres sous-thèmes.

Une ligne de légende (**LegendLeaf**) définit la symbolisation devant être appliquée à des objets d'une ou de plusieurs familles d'objets cartographiques (**SymbolisedFeatureCollection**).

Des relations (**SemanticRelation**) d'association, d'ordre ou de différenciation existent entre les différentes lignes de légende (**LegendLeaf**). Des relations de voisinage (**NeighborhoodRelationship**) existent également entre les objets cartographiques qui sont proches sur la carte ; ces relations sont utilisées pour évaluer la qualité des contrastes de couleur entre les objets voisins

Modèle des indices et de l'application principale

L'ensemble d'indices défini pour évaluer les caractéristiques des cartes liées à certains problèmes lors de la mauvaise utilisation des variables visuelles est le suivant:

- Indice de superposition,
- Indice de taille,
- Indice de contraste de couleurs,
- Indice de quantité de couleurs désagréables,
- Indice de bordure.

Pour chaque carte, cet ensemble d'indices est recalculé en prenant en compte les caractéristiques de cette carte (symbolisation utilisée, ordre de superposition des couches, échelle). Ainsi, les valeurs d'un ensemble d'indices en particulier correspondent à une et une seule carte représentant des données géographiques symbolisées selon une légende donnée à une échelle en particulier (Figure 97). Dans le modèle suivant, la classe « Données cartographiques » est une simplification qui consiste en réalité en plusieurs types de données qui représentent les objets cartographiques symbolisés, l'ordre des couches et l'échelle utilisée.

Dans le système développé, à chaque indice est associée une classe Java, toutes les classes correspondant à un indice implémentent une interface unique nommée « *Indice* ». Le reste du système interagira avec ce type « *Indice* » ce qui simplifiera le code en permettant au développeur d'utiliser un type unique pour manipuler l'ensemble de ces indices.

Le modèle UML (diagramme de classes) qui correspond est illustré dans la Figure 98.

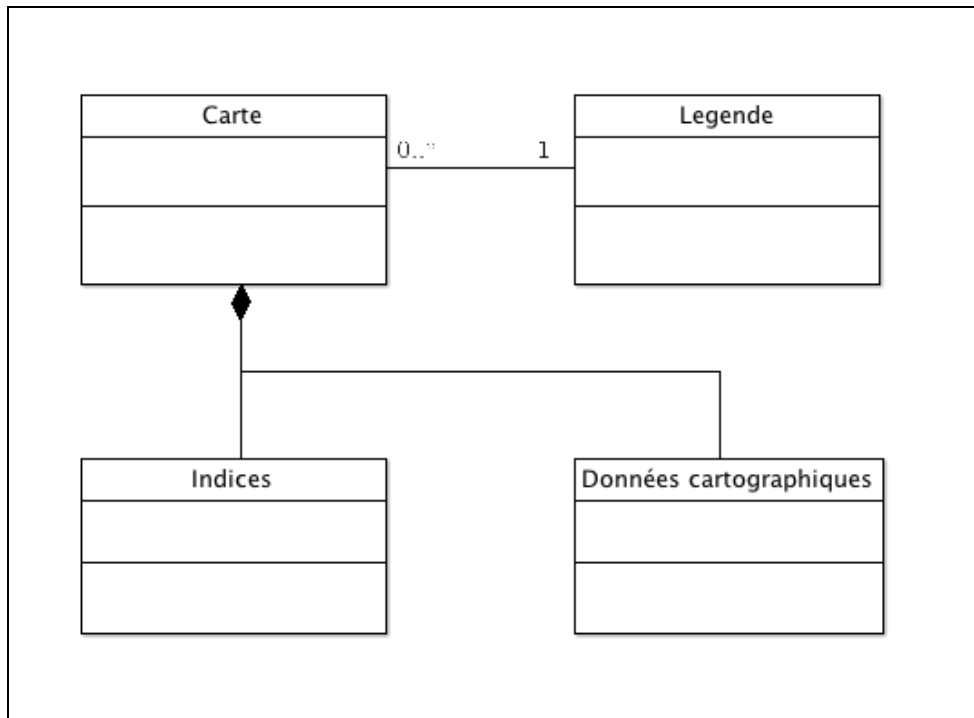


FIGURE 97 UNE CARTE EST COMPOSEE DE DONNEES CARTOGRAPHIQUES REPRESENTES SELON UNE LEGENDE. CETTE CARTE EST CARACTERISEE PAR UN ENSEMBLE D'INDICES

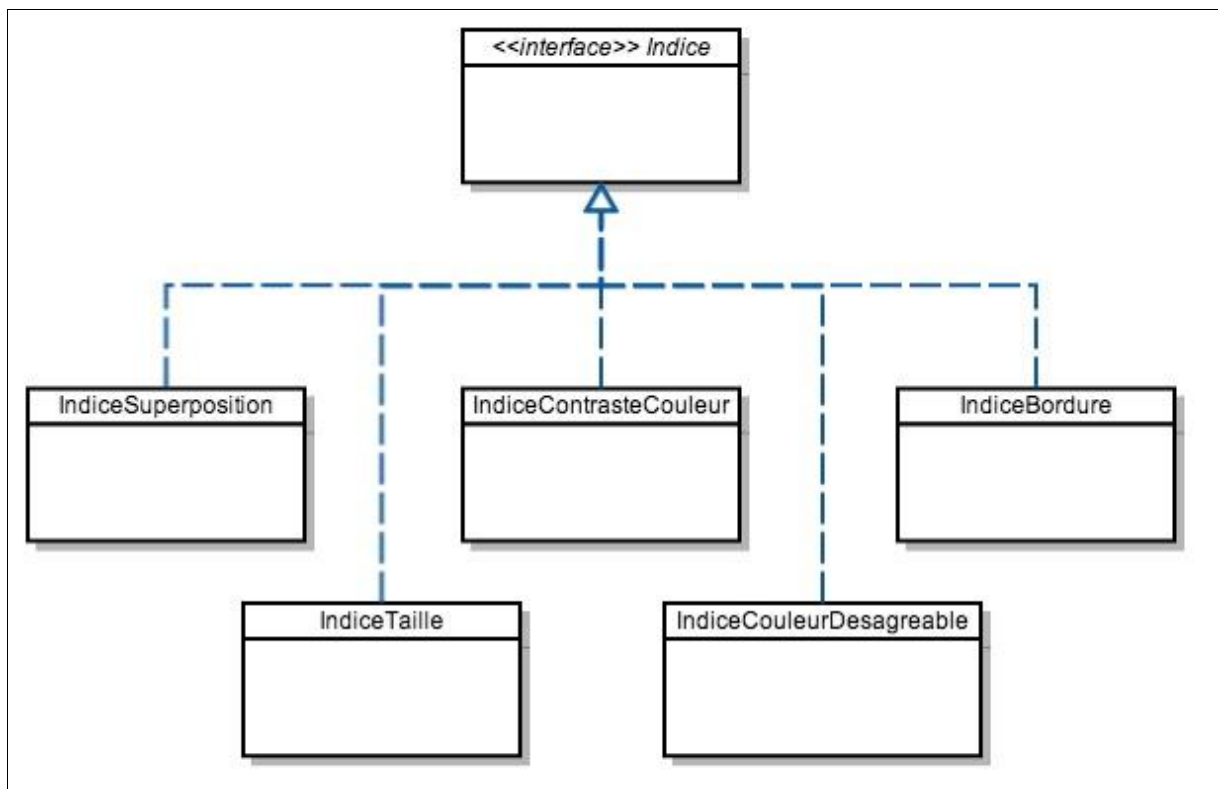


FIGURE 98 SCHEMA CONCEPTUEL DES INDICES D'UNE CARTE GEOGRAPHIQUE

De la même manière, les algorithmes de modifications automatiques d'une symbolisation dans la carte sont séparés en une classe Java pour chaque algorithme. Nous avons donc les classes : **ModifierTaille**, **ModifierBordure**, **ModifierCouleur**, et **ModifierSuperposition**, qui

permettent de contrôler et de modifier la représentation des symboles présents sur la carte dans le but d'améliorer leur visibilité.

À l'image de ce qui a été fait pour les indices, ces quatre classes implémentent elles-aussi une interface unique « Amélioration ». Le diagramme de classes est le suivant (Figure 99) :

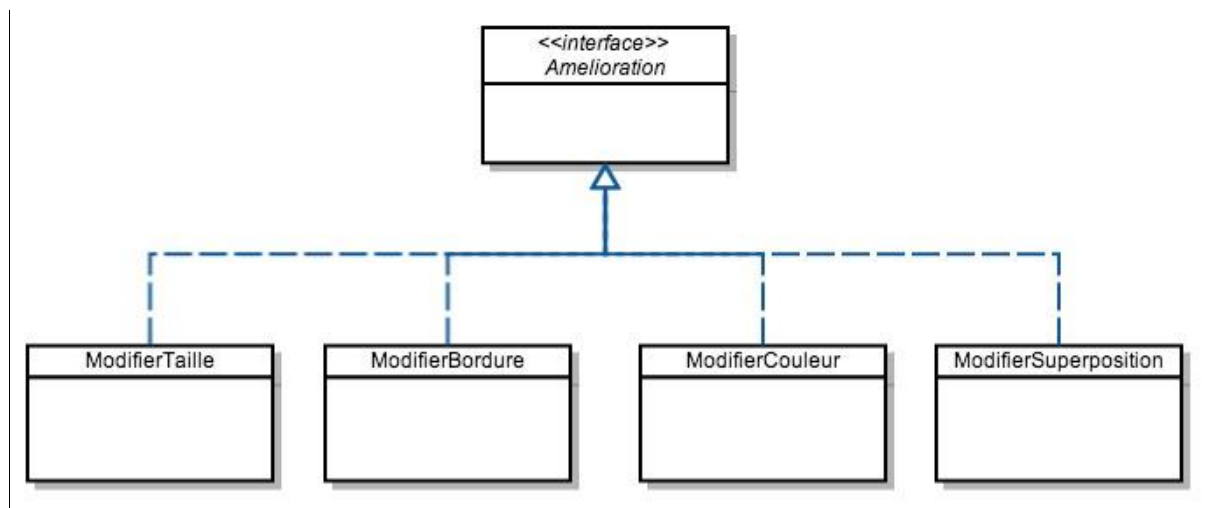


FIGURE 99 SCHEMA CONCEPTUEL DES AMELIORATIONS DE SYMBOLISATIONS SUR UNE CARTE

L'outil d'évaluation et d'amélioration de la visibilité qui implémente ce modèle, est constitué d'une classe mère **IndiceApplication** qui interagit avec la plupart des objets nécessaires au déroulement du processus.

Le diagramme de classe de l'application conçue se présente donc comme suit (Figure 100) :

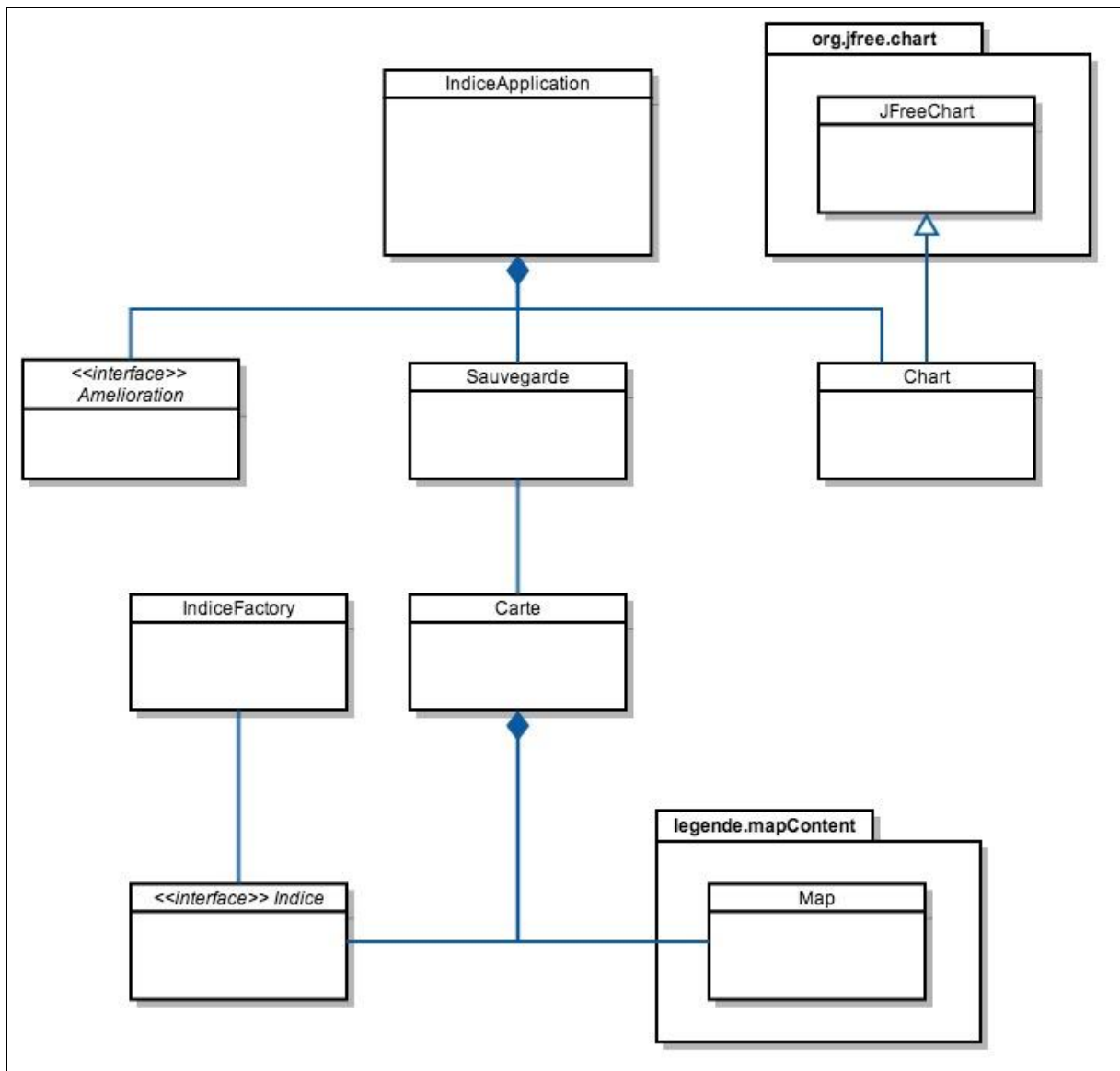


FIGURE 100 SCHEMA CONCEPTUEL SIMPLIFIE DU SYSTEME INDICEAPPLICATION

L'ensemble des implémentations des différents indices est inclus dans l'application. Leurs instances sont créées par l'intermédiaire d'une classe de fabrication, **IndiceFactory**. Cette classe est nécessaire afin de veiller à ce qu'il y ait une seule instance de chaque indice à la fois dans le but d'éviter la concurrence entre objets qui peut mener au pire à l'incohérence des résultats et au mieux à l'explosion du temps de calcul nécessaire.

La classe **Sauvegarde** permet de sauvegarder une **Carte** avec les valeurs de ses indices dans une base de données, et permet aussi d'exécuter le processus inverse à savoir le chargement de cette même base de données et l'affichage de l'ensemble des **Cartes** avec une représentation graphique de leurs indices respectifs.

Cette représentation graphique est possible grâce à la classe **Chart** qui, via l'API **JFreeChart**, peut dessiner des graphiques du genre Histogramme, Camembert et Etoile à partir de données fournies en paramètres.

4.4. JEUX DE DONNEES

Le prototype IndiceApplication réalise ses tâches en manipulant des objets Java qui représentent les données géographiques et cartographiques. L'origine de ces données n'est pas importante pour qu'IndiceApplication puisse s'exécuter correctement. C'est pour cela que le prototype IndiceApplication donne la possibilité aux utilisateurs de charger des données géographiques aussi bien depuis une base PostGIS que depuis des fichiers ShapeFile, l'important est que ces données puissent être converties en classes Java exploitables par l'application.

Les exemples présentés et utilisés pour illustrer le calcul des indices de visibilité, la modification des symbolisations, ainsi que pour préparer les tests sont issus de la BD TOPO de l'IGN. Deux extraits sont utilisés. Le premier est celui d'Allevard dans l'Isère (38) qui est une petite ville dans la montagne et est donc qualifiée de zone rurale, le deuxième est la ville de Royan en Charente-Maritime (17) qui est située en bord de mer et qui peut être qualifiée de zone urbaine/mer.

Ces deux extractions (Allevard et Royan) ont été réalisées par Sidonie Christophe (2009) et présentés dans son mémoire de thèse.

4.5. EXEMPLE DE SCENARIO D'UTILISATION

Faute de temps nous n'avons pas codé un algorithme de convergence automatique. Le système propose des améliorations qui sont validées ou non par l'utilisateur.

L'utilisation type de l'outil IndiceApplication se déroule ainsi :

- 1- Chargement des données via le menu prévu à cet effet
- 2- Exécution de l'évaluation des indices de visibilité
- 3- Lancement du processus d'amélioration
 - a. Le système propose des modifications de symbolisations
 - b. L'utilisateur choisit ou non de les appliquer
- 4- Répétitions en boucle des étapes 2 et 3 tant que l'utilisateur n'est pas satisfait du résultat final ou tant que les valeurs des indices ne sont pas maximales.
- 5- Enregistrement de la carte finale obtenue en utilisant les symbolisations proposées.

En cours de traitement (entre les étapes 2 et 3), l'utilisateur peut sauvegarder une version intermédiaire de sa carte avec les valeurs des indices. Il pourra les recharger plus tard et les visualiser s'il le souhaite.

5. TESTS DE VALIDATION

Dans le but d'évaluer et de valider l'efficacité du modèle et la pertinence des indices de visibilité conçus pendant le déroulement de cette thèse, trois tests dont deux tests fonctionnels ont été conduits au sein du laboratoire COGIT.

Le premier test, appelé **test de validation des indices (5.2)**, avait pour objectif de valider la pertinence des indices de visibilité. Il s'agissait donc de vérifier que les valeurs calculées de chaque indice reflètent le ressenti des testeurs vis-à-vis de la carte et de l'aspect de cette carte caractérisée par cet indice.

Le deuxième test, appelé **test de validation des algorithmes (5.3)**, concernait principalement les algorithmes d'amélioration de visibilité des objets. Son objectif est de vérifier qu'une variation des valeurs des indices en mieux ou en pire reflète également le ressenti des testeurs. Son deuxième objectif est de déterminer des seuils de représentation en-dessous ou au-dessus desquels la visibilité est dégradée.

Un troisième test, appelé **test de déficience visuelle (5.1)**, a été mené en amont des deux premiers pour s'assurer que les testeurs ne sont pas atteints de déficiences visuelles.

Un échantillon de 32 personnes a effectué le premier test sur une période de deux semaines dans des conditions environnementales générales équivalentes : même écran, même luminosité, même position, même heure de la journée.

Un sous-échantillon de 22 personnes a effectué le second test sur une période de 3 jours dans des conditions d'environnement équivalentes.

5.1. TEST DE DEFICIENCES VISUELLES

Ce premier test est mené afin de vérifier que les testeurs n'étaient pas atteints d'une déficience visuelle, en particulier d'une forme de daltonisme. En effet, les deux tests suivants s'appuyant sur la perception des couleurs, toute forme de daltonisme modifiera cette perception et pourra donc avoir des répercussions sur les résultats et les conclusions des tests.

Le test mené est issu du test chromatique d'Ishihara (1917), test choisi pour sa simplicité et la rapidité de son exécution. Le but n'étant pas de conduire un test complet pour déceler les déficiences visuelles, seules 7 planches (voir Annexe) parmi les 38 du test initial ont été présentées aux testeurs qui pouvaient les regarder en vision binoculaire (les deux yeux à la fois au lieu de refaire le test deux fois, une fois par œil). Ces 7 planches sont extraites des 7 sections qui composent le test à raison d'une planche par section (exemple en Figure 101).

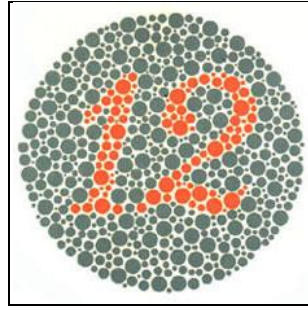


FIGURE 101 PLANCHE NUMERO 1 ISSUE DU TEST D'ISHIHARA (IL FAUT PERCEVOIR UN « 12 » SUR CE DESSIN)

5.2. TEST DE VALIDATION DES INDICES DE VISIBILITE

L'objectif général de ce premier test fonctionnel est de valider la pertinence des indices de visibilité choisis et présentés dans ce rapport (chapitre B.2) ainsi que de valider la pertinence des formules de calcul et donc des valeurs de ces indices selon les configurations proposées par les différentes cartes.

Un échantillon de 32 personnes a effectué ces tests sur une période de deux semaines dans des conditions environnementales générales équivalentes (même écran, même luminosité, même position, même heure de la journée). Chaque itération du test se déroulait entre 10 et 20 minutes par personne, avec l'exception d'un testeur qui a passé 28 minutes sur l'ensemble du test.

Sur ces 32 personnes :

- Aucune n'est atteinte de déficience visuelle.
- 14 ont un niveau en cartographie entre confirmé et avancé.
- 8 ont un niveau en cartographie entre débutant et intermédiaire.
- 10 n'ont pas de connaissances en cartographie.

Le test a été construit sur une plateforme web locale développée en PHP et Javascript. Cette plateforme web permet de présenter une question, un contenu média (des cartes géographiques) et une liste de possibilités parmi lesquelles les testeurs peuvent faire un choix. Cette plateforme permet également le retour en arrière pour modifier une réponse si cela est nécessaire. L'ensemble des réponses d'un utilisateur est par la suite sauvegardé dans une base de données MySQL locale. Le test étant anonyme, l'identité des testeurs n'a pas été enregistrée. Pour pouvoir l'utiliser localement, cette plateforme web a été installée et lancée à partir du système WAMP qui intègre un serveur web Apache, un interpréteur PHP pour exécuter le code, et un serveur de base de données MySQL.

Les résultats sont classés par indices. Les analyses des données récoltées durant ces tests seront présentées dans les paragraphes suivants.

a) Indice de superposition :

Rappel : L'indice de superposition a pour objectif de caractériser le taux de chevauchement des objets de la carte pour un ordre donné d'affichage des couches.

Dans ce premier test, deux sous-tests ont été réalisés :

Le premier sous-test a un double objectif :

- vérifier que les testeurs sont capables de reconnaître une différence dans l'ordre d'affichage de couches ;
- vérifier que l'indice de superposition varie dans le même sens que la lisibilité des cartes vue par les testeurs.

Trois paires de cartes ont été présentées. Pour chaque paire l'ordre de l'affichage des couches est différent. Dans la première paire (Figure 102) et la seconde paire (Figure 103), la couche « route » et la couche « végétation » sont représentées selon un ordre d'affichage différent pour chaque carte. Dans la troisième paire (Figure 104), la couche « route » est représentée une fois au-dessus des couches « végétation » et « hydrographie », et une deuxième fois en dessous. Il est par la suite demandé aux testeurs s'ils parviennent à trouver des différences entre les cartes de chaque paire, et quelles sont les différences relevées.



FIGURE 102 DEUX CARTES AVEC UN ORDRE DE SUPERPOSITION DES COUCHES DIFFERENT



FIGURE 103 DEUX CARTES AVEC UN ORDRE DE SUPERPOSITION DES COUCHES DIFFERENT



FIGURE 104 DEUX CARTES AVEC UN ORDRE DE SUPERPOSITION DES COUCHES DIFFERENT

Ce premier sous-test ayant été réalisé par 32 testeurs, $3 \times 32 = 96$ comparaisons ont donc été faites. Sur un total de 96 comparaisons, 95 ont été correctes, à savoir reconnaître la différence de l'ordre de superposition des couches entre les cartes de chaque paire. Dans un seul cas l'utilisateur n'a pas remarqué la différence de l'ordre des couches. Ce qui représente environ 4.16% du total des réponses.

Le deuxième sous-test a pour objectif de vérifier qu'à une faible variation de l'indice de superposition correspond une faible variation de l'appréciation des testeurs quant à la lisibilité des cartes.

Deux cartes avec un ordre des couches différent ont été présentées (Figure 105). Il a été demandé aux testeurs d'estimer si la différence entre les deux est « mineure », « moyenne », « majeure », ou s'il n'y avait pas de différences.

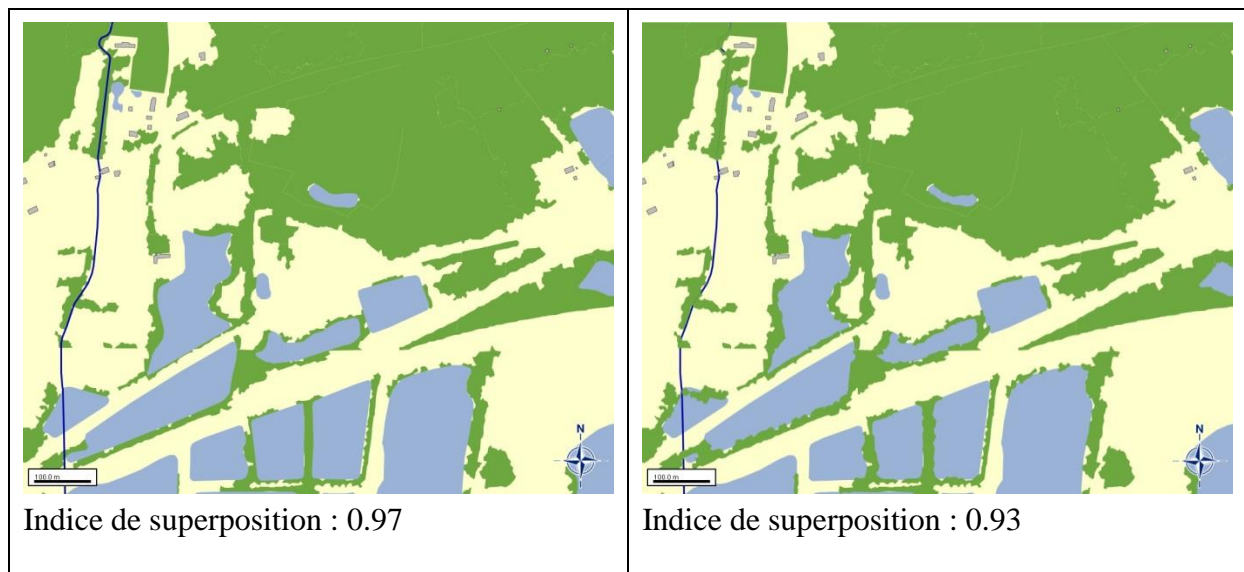


FIGURE 105 DEUX CARTES AVEC UN ORDRE DE SUPERPOSITION DES COUCHES DIFFERENT, ET UNE VARIATION DE LA VALEUR DE LEURS INDICES DE SUPERPOSITION TRES FAIBLE

Les réponses sont réparties comme suit : 5 ont estimé que les cartes sont identiques, 4 ont estimé que la différence est « majeure », 6 ont estimé que la différence est « moyenne », et 17 ont trouvé que la différence est « mineure ».

La différence des valeurs entre les indices des deux cartes très faible, traduit une différence visuelle minime. **53%** des testeurs ont remarqués des différences entre les deux cartes mais les considèrent comme **minimes**, tandis que **16%** des testeurs ont estimé qu'il n'y avait **pas de différences**. **19%** considèrent que la différence est **moyenne**. Et **12%** considèrent que la différence est **majeure**.

La majorité de ceux qui ont estimé que la différence entre les deux cartes était majeure ont un niveau confirmé en cartographie. Ils ont remarqué que dans la seconde carte, une partie d'un cours d'eau est recouverte par de la végétation. Le cours d'eau ayant une implantation linéaire, et la végétation une implantation surfacique, il est alors incorrect selon les conventions en vigueur de représenter les surfaciques au-dessus des linéaires. Le reste des testeurs ont soit estimé que cet ordre ne les gênait pas beaucoup, soit n'ont pas remarqué que le cours d'eau était en dessous de la végétation.

Nous pouvons donc conclure que l'indice de superposition traduit bien la différence entre les ordres de couches selon les cartes, étant donné que la variation de l'indice entre les deux cartes (de 0.97 à 0.93) est minime. Par contre la différence des valeurs de cet indice ne reflète surtout que l'avis des testeurs qui n'ont pas ou peu de connaissances et d'expériences en cartographie. Un ajustement dans les méthodes de calcul pourrait être envisagé afin de s'aligner davantage sur l'avis des testeurs confirmés en cartographie et ainsi avoir pour ce cas une différence des valeurs de l'indice plus importante.

b) Indice de taille :

Rappel : L'indice de taille permet de déterminer si le nombre d'objets de petite surface difficilement distinguables présents sur la carte est élevé ou non

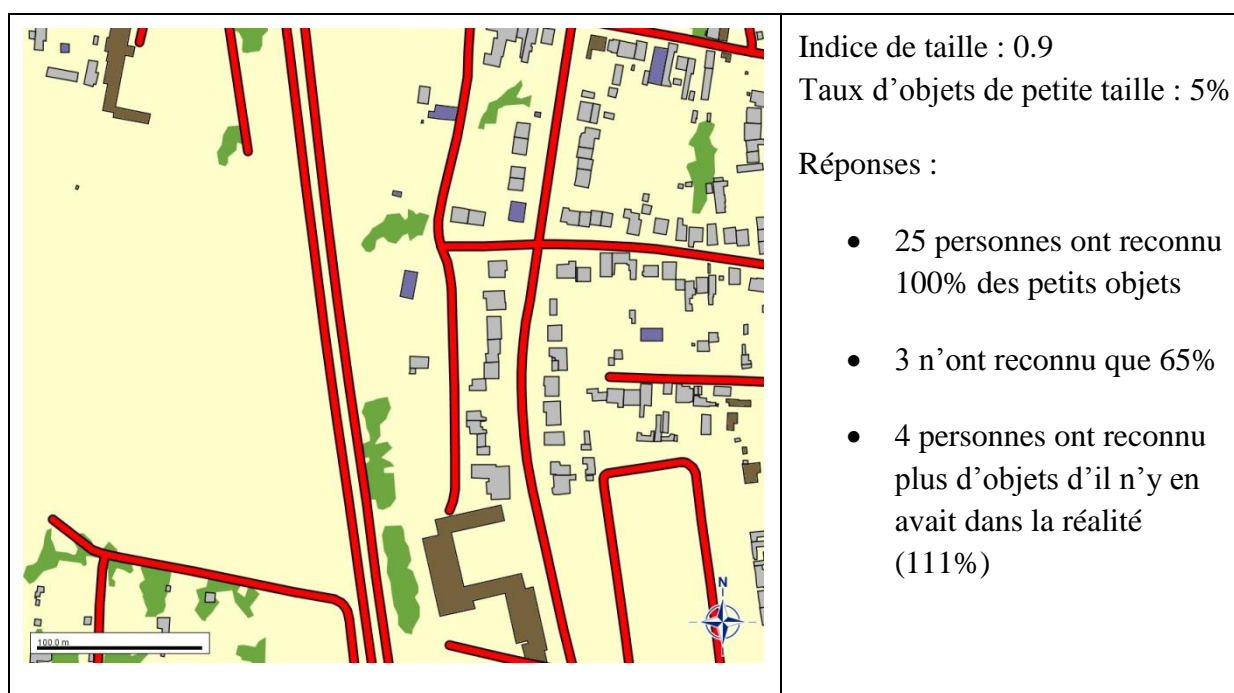
Deux sous-tests ont été réalisés pour vérifier la pertinence de l'indice de taille. Dans le premier sous-test, on vérifie que le nombre de petits objets reconnus varie dans le même sens que la valeur de l'indice de taille. Dans le deuxième sous-test, on vérifie la réciproque, à savoir : si l'indice de taille est bon le nombre d'objets de petites tailles reconnus est bon aussi.

Dans le premier sous-test, une série de 3 cartes est présentée aux testeurs, chacune d'entre elles contient plusieurs objets dont certains de petite taille. Il est ensuite demandé aux testeurs de compter le nombre d'objets des thèmes « terrain de sport » représenté en violet, et « usine » représenté en marron.

Dans le tableau suivant (Figure 106) les trois cartes sont présentées avec leurs valeurs respectives de l'indice de taille, le taux d'objets de petite taille dans chacune de ces cartes, ainsi que les réponses des testeurs. Les réponses sont présentées de la sorte :

Le nombre de testeurs : Le pourcentage d'objets reconnus par rapport aux nombre d'objets réel.

Dans certains cas, des testeurs ont cru reconnaître des objets qui ne font pas partie des thèmes « terrain de sport » et « usine », ils ont donc reconnus plus d'objets que le nombre réel. Par exemple dans la deuxième carte du tableau ci-dessous, il y a 8 usines et 8 terrains de sports, certains testeurs ont reconnus 7 usines parmi les 8, et ont cru reconnaître 10 terrains de sport, le pourcentage obtenu est donc $(7 + 10) / (8 + 8) = 106\%$.



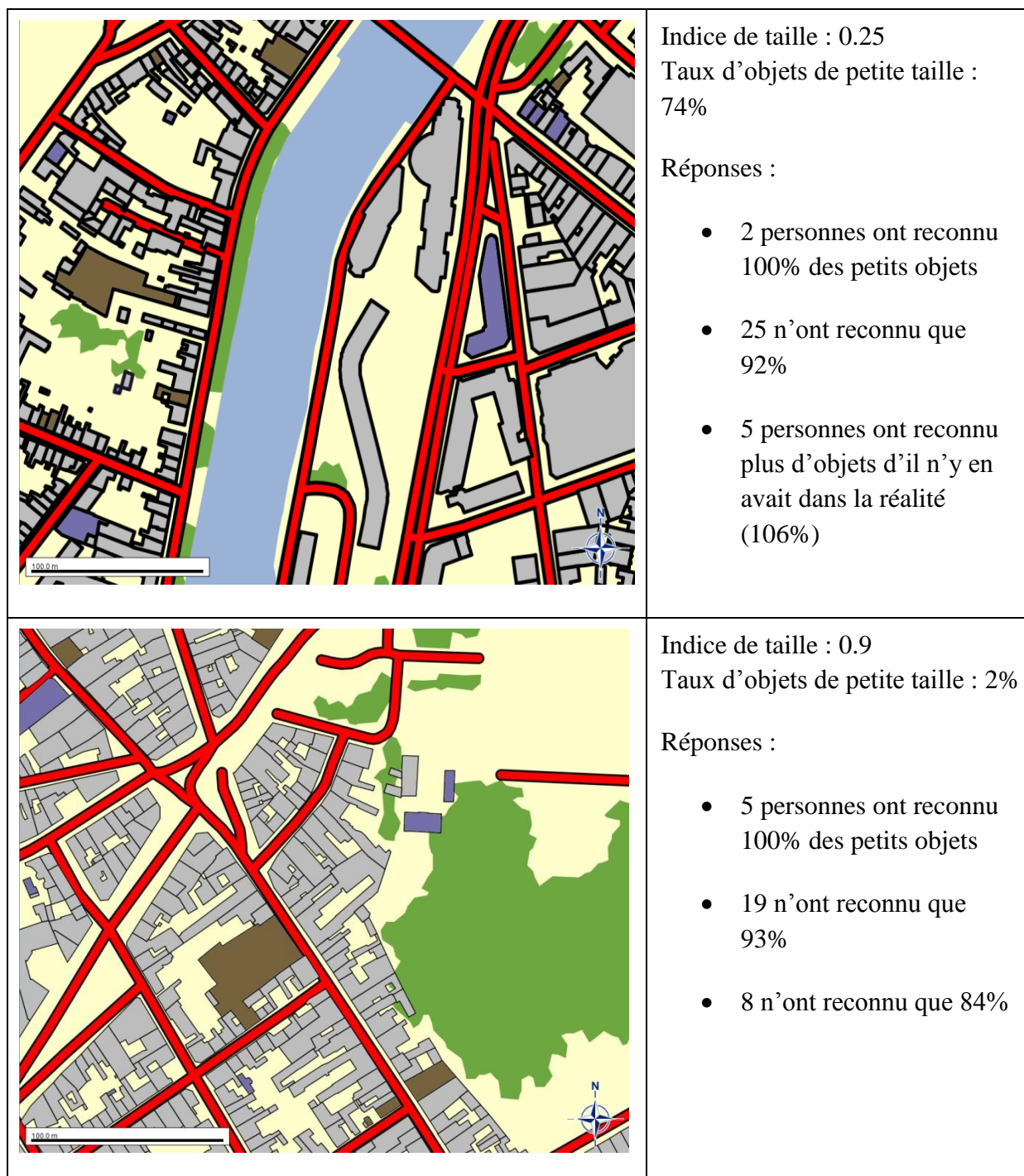


FIGURE 106 LES TROIS CARTES PRESENTEES LORS DU PREMIER SOUS-TEST DE L'INDICE DE TAILLE

Dans le deuxième sous-test, une 4^{ème} carte (Figure 107) est présentée aux testeurs en leur demandant de compter le nombre d'objets dont ils ne peuvent reconnaître le thème.

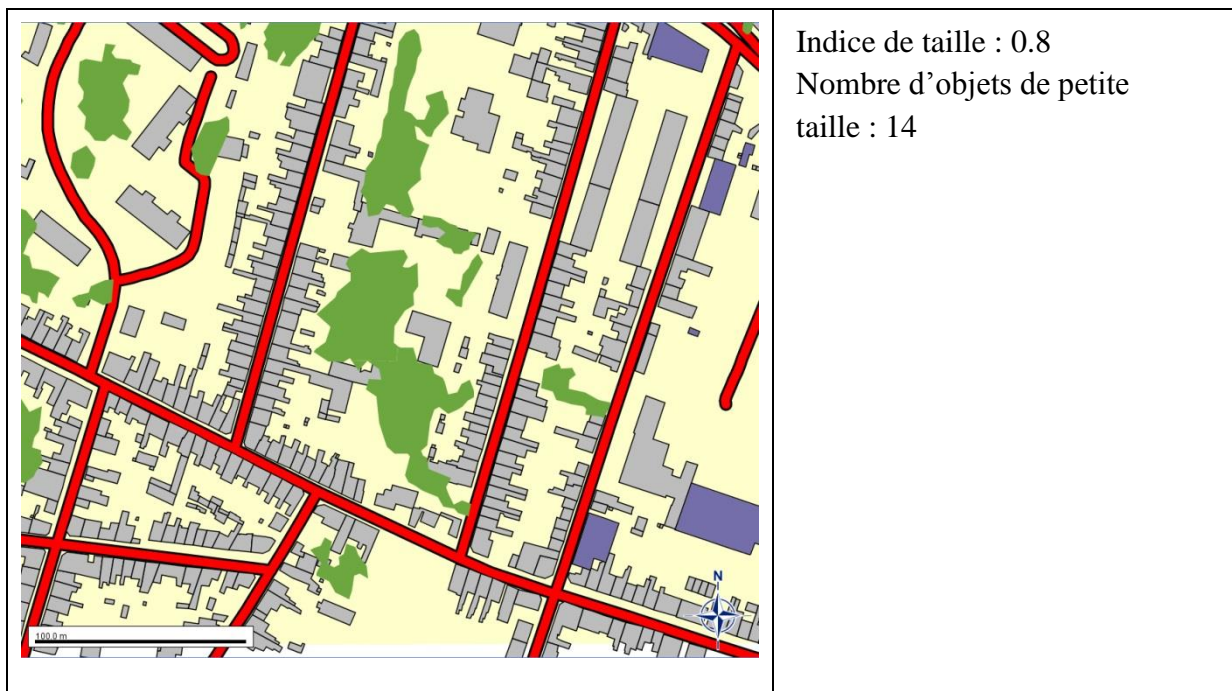


FIGURE 107 LA CARTE PRESENTÉE LORS DU DEUXIÈME SOUS-TEST DE L'INDICE DE TAILLE

Pour cette quatrième carte, 22 testeurs ont dit que le nombre d'objets dont ils n'ont pas pu reconnaître le thème est de deux objets. Quatre ont dit qu'ils n'arrivent pas à reconnaître un nombre d'objets inférieur à 5. Cinq personnes ont dit que ce nombre est compris entre 5 et 10. Et une personne a dit ne pas reconnaître plus de 10 objets.

Dans le premier sous-test les réponses des testeurs allaient dans le même sens que celle de la valeur de l'indice. Lorsque la valeur de l'indice est forte, les testeurs ont pu en majorité reconnaître la plupart des objets présents dans les thèmes demandés. A l'inverse, lorsque la valeur de l'indice est faible, la majorité des testeurs ont eu du mal à reconnaître tous les objets des thèmes demandés.

De même, dans le deuxième sous-test, la distribution du nombre des testeurs selon le nombre d'objets qu'ils n'arrivent pas à reconnaître est cohérente avec la valeur de l'indice de taille. En effet, l'indice de taille est de 0.8, et 81% des testeurs ne reconnaissent pas que 5 objets sur un total de plus de 300 objets représentés sur la carte.

Une remarque peut être faite toutefois, dans le deuxième test, le nombre d'objets considérés comme « petits » par le modèle, et de 14. Tandis que le nombre d'objets non reconnus par la plupart des testeurs est inférieur à 10. Ceci peut nous mener dans des recherches ultérieures à reconsidérer la condition qui détermine si un objet est de petite taille ou non afin que le nombre soit plus proche de l'avis des lecteurs de cartes de manière générale.

Nous pouvons donc conclure à partir de ce test que l'indice de taille reflète la perception qu'ont les testeurs des petits objets sur une carte.

Ce test confirme donc la pertinence de cet indice quant à l'évaluation de cet aspect des cartes géographiques (la présence de petits objets difficilement lisibles).

c) Indice de bordure :

Rappel : L'indice de bordure a pour objectif de caractériser le taux de chevauchement des objets de la carte par leurs bordures respectives.

Deux tests ont été menés pour l'indice de bordure.

Les deux tests menés ont pour objectif de vérifier la pertinence de l'indice de bordure et de le nuancer en tenant compte de l'impact d'une autre caractéristique de symbolisation des objets étudiée : la variation de la couleur.

Dans le premier test, trois cartes ont été présentées aux testeurs (Figure 108). Dans ces trois cartes les bâtiments sont représentés par une couleur faiblement contrastée avec celle des objets voisins. La différence entre les cartes se situe au niveau de l'épaisseur des bordures de ces bâtiments. Dans la première carte, une bordure noire épaisse a été rajoutée à ces bâtiments. Dans la deuxième, cette bordure est supprimée. Dans la dernière, cette bordure est d'épaisseur moyenne. Il est ensuite demandé aux testeurs de choisir la carte la plus compréhensible et la plus lisible.

carte 1



Indice de bordure : 0.6

carte 2



Indice de bordure : Non pertinent

carte 3



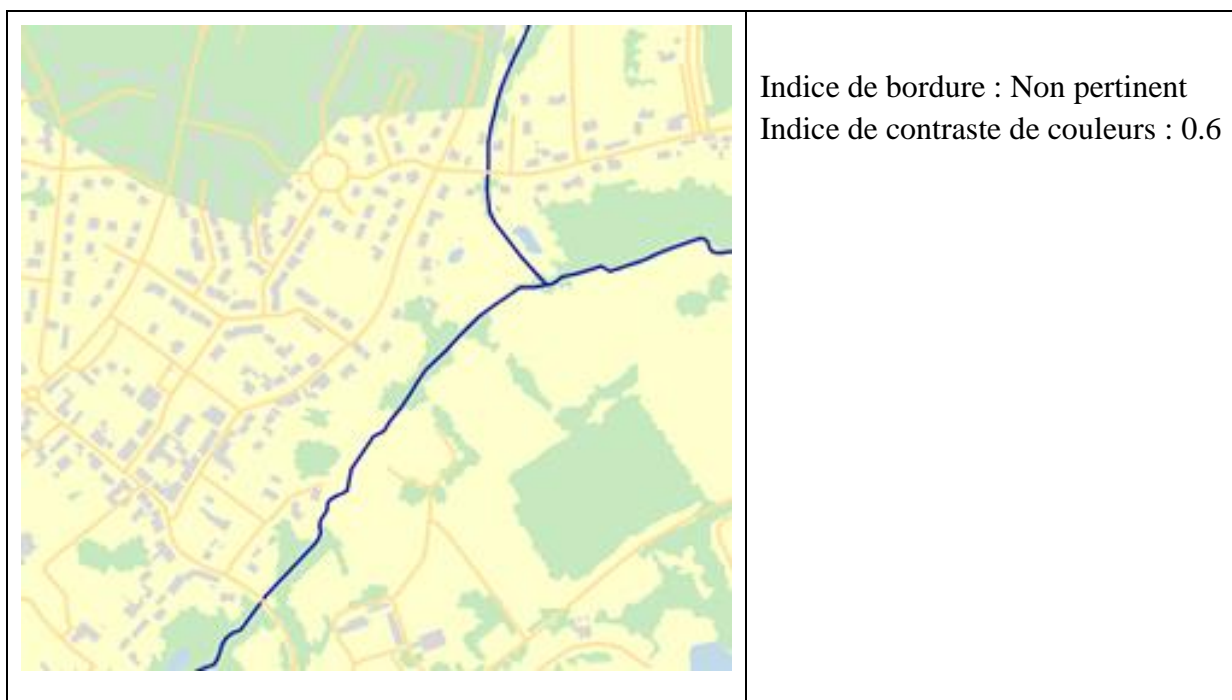
Indice de bordure : 0.9

FIGURE 108 LES TROIS CARTES PRESENTEES LORS DU PREMIER TEST RELATIF A L'INDICE DE BORDURE

Une personne a choisi la seconde carte, sans bordure, comme celle la plus compréhensible. Sa raison était que la bordure des bâtiments détournait son attention de la route qu'il considère comme l'élément le plus important de la carte. Le reste des testeurs (31 personnes) ont choisi la troisième carte avec une épaisseur de bordure moyenne.

Nous pouvons en conclure rapidement que la présence d'une bordure peut aider à la reconnaissance et la lecture des objets, mais si sa largeur dépasse un seuil maximale, elle devient gênante pour la lecture de la carte.

Dans le deuxième test, 3 autres cartes contenant des objets « bâtiments » ont été aussi présentées aux testeurs (Figure 109). Dans la première, ces objets, sans bordure, ont une couleur faiblement contrastée avec celles des objets voisins. Dans la seconde, ces objets ont la même couleur mais il leur a été rajouté une bordure noire. Dans la dernière carte, la valeur de la couleur de ces objets a été modifiée pour augmenter le contraste avec les objets voisins.



	<p>Indice de bordure : 0.8 Indice de contraste de couleurs : 0.662</p>
	<p>Indice de bordure : Non pertinent Indice de contraste de couleurs : 0.813</p>

FIGURE 109 LES TROIS CARTES PRESENTEES LORS DU DEUXIEME TEST DE L'INDICE DE BORDURE : VARIATION D'EPAISSEUR DE BORDURE ET VARIATION DU CONTRASTE DE COULEURS

Il est ensuite demandé aux testeurs de noter la lisibilité des objets « bâtiments » dans chacune de ces cartes. Les réponses se répartissent comme suit.

Carte 1	Carte 2	Carte 3
Parfaitement lisibles : 3.125%	Parfaitement lisibles : 34.375%	Parfaitement lisibles : 100%
Moyennement lisibles : 31.25%	Moyennement lisibles : 62.5%	Moyennement lisibles : 0%
Difficilement lisibles : 62.5%	Difficilement lisibles : 3.125%	Difficilement lisibles : 0%
Totalement illisibles : 3.125%	Totalement illisibles : 0%	Totalement illisibles : 0%

TABLEAU 2 REPONSES DES TESTEURS AUX QUESTIONS DU TEST D'INDICE DE BORDURE

Il ressort donc de ces deux test qu'une bordure peut améliorer considérablement la visibilité d'objets dont la couleur est faiblement contrastée avec celles de leurs voisins. En revanche, cette bordure ne doit pas excéder une épaisseur limite afin de ne pas gêner la reconnaissance des objets de petites tailles. Et pour finir, même si la présence de bordure aide la lecture d'une carte, la représentation d'objets dont la couleur est correctement contrastée avec celle de leurs voisins (même sans bordure) est préférée par l'échantillon des testeurs interrogés. En effet, la bordure en elle-même est un objet graphique distinct rajouté sur les objets cartographiques déjà présents sur la carte. Même si ce nouvel objet graphique peut améliorer la visibilité (et donc la lisibilité) d'objets existants, il rajoute de nouveaux détails et donc augmente la « complexité » visuelle.

d) Indice de quantité de couleurs désagréables :

Rappel : L'indice de quantité de couleurs désagréables permet de déterminer et de faire ressortir les couleurs très visibles et/ou présentes en grande quantité sur la carte et ainsi d'éviter l'abondance de couleurs menant à l'inconfort visuel telles que les couleurs fluorescentes, les couleurs vives, les couleurs grisées, ou les couleurs très foncées.

Deux tests ont été réalisés pour l'indice de quantité de couleurs désagréables.

Premier test :

Dans ce premier test, deux cartes (Figure 110 et Figure 111) ont été présentées aux testeurs en leur demandant pour chacune si la carte est « belle », « lisible et compréhensible », et s'ils ont « éprouvé un inconfort dû à une ou plusieurs couleurs » et si oui, lesquelles.

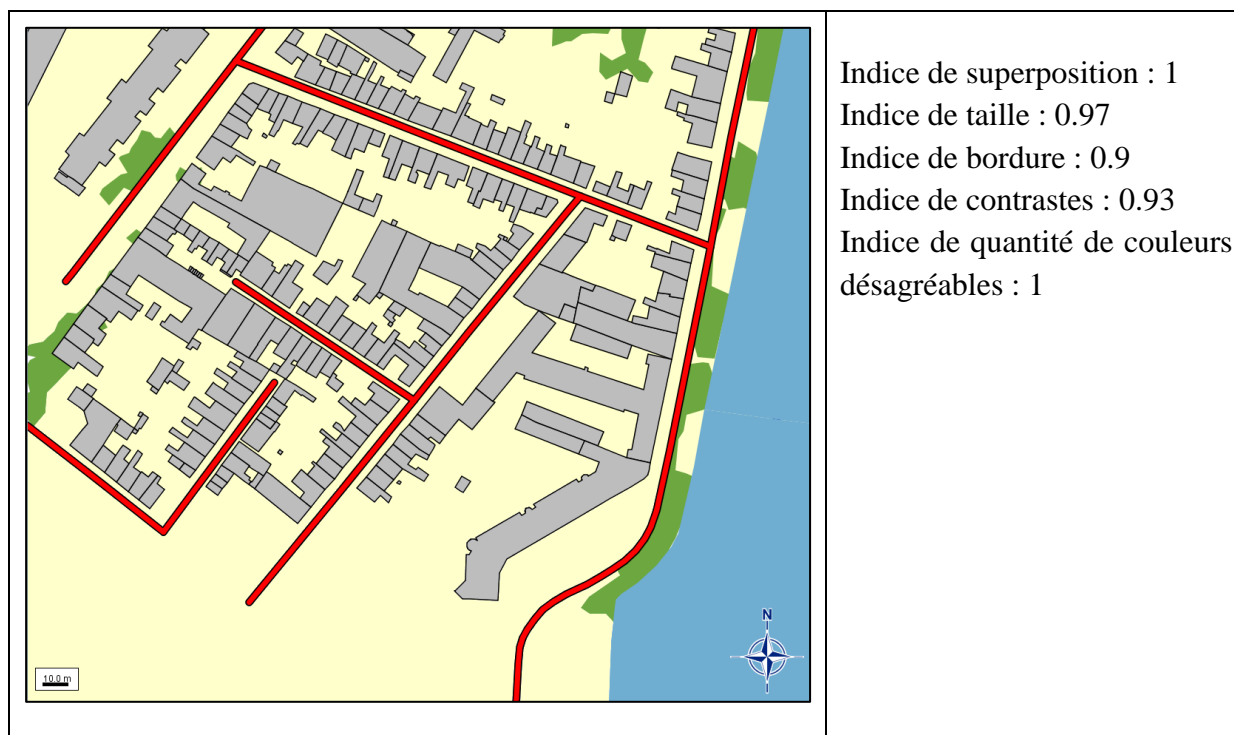


FIGURE 110 « CARTE 1 » PRESENTÉE LORS DU TEST DE QUANTITÉ DE COULEURS DÉSAGRÉABLES

La carte est esthétiquement belle	La carte est lisible et compréhensible	Avez-vous éprouvé un inconfort dû à une ou plusieurs couleurs ?
Tout à fait d'accord : 9.375% Plutôt d'accord : 62.5% Neutre : 21.875% Plutôt pas d'accord : 3.125% Pas du tout d'accord : 3.125%	Tout à fait d'accord : 59.375% Plutôt d'accord : 40.625%	oui : 15.625% (le bleu de la mer) non : 84.375%

TABLEAU 3 REPONSES DES TESTEURS AUX QUESTIONS DU TEST D'INDICE DE COULEURS DÉSAGRÉABLES À PROPOS DE LA CARTE 1 EN FIGURE 110

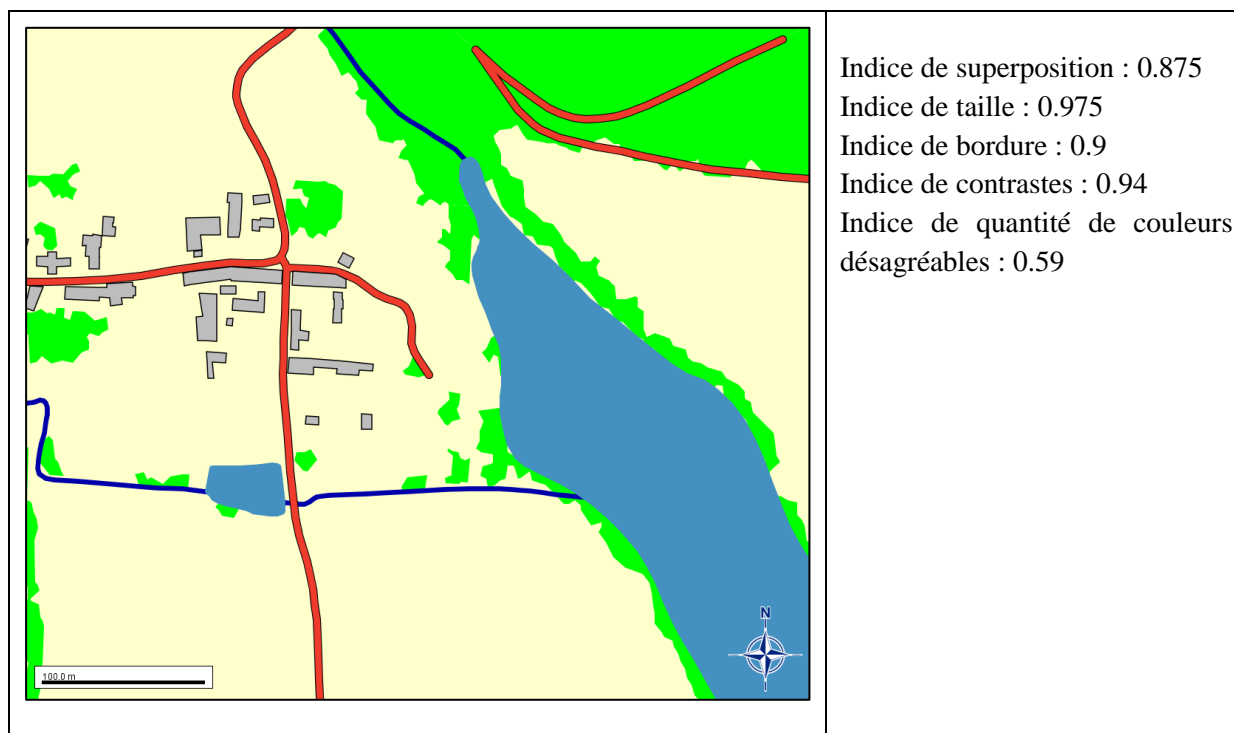


FIGURE 111 « CARTE 2 » PRESENTÉE LORS DU TEST DE QUANTITÉ DE COULEURS DÉSAGRÉABLES

La carte est esthétiquement belle	La carte est lisible et compréhensible	Avez-vous éprouvé un inconfort dû à une ou plusieurs couleurs ?
Tout à fait d'accord : 3.125%	Tout à fait d'accord : 56.25%	oui : 81.25% (le vert fluo de la végétation)
Plutôt d'accord : 28.125%	Plutôt d'accord : 34.375%	non : 18.75%
Neutre : 21.875%	Neutre : 3.125%	
Plutôt pas d'accord : 15.625%		
Pas du tout d'accord : 31.25%		

TABLEAU 4 REPONSES DES TESTEURS AUX QUESTIONS DU TEST D'INDICE DE COULEURS DÉSAGRÉABLES À PROPOS DE LA CARTE 2 EN FIGURE 111

Ainsi, il ressort de ce test que la présence de couleurs désagréables, bien qu'elle n'influe pas directement (dans ce cas précis) sur la lisibilité d'une carte, peut engendrer un fort inconfort visuel à la lecture de celle-ci. L'opinion des testeurs, vis-à-vis de l'esthétique de la carte est elle aussi sensible à la présence de couleurs désagréables.

Deuxième test :

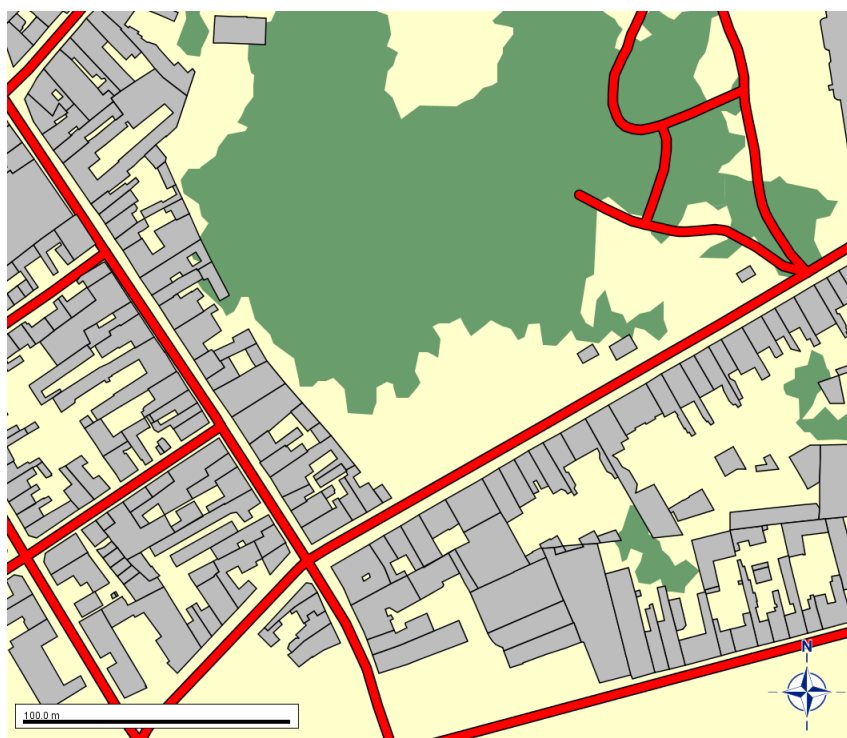
Dans le second test, trois versions de deux cartes différentes (Figure 112 et Figure 113) ont été présentées aux testeurs. Une couleur a été modifiée dans chaque version de chaque carte. Il est ensuite demandé à ces testeurs de noter l'inconfort visuel qu'ils ont pu ressentir par rapport à cette couleur. Les notes vont de -2 (inconfort poussé) à 2 (couleurs agréables).

Les six cartes présentées aux testeurs (Avec « Indice de QCD » = Indice de quantité de couleurs désagréables) avec les réponses de ces derniers en gras :





FIGURE 112 LES TROIS VERSIONS DE LA « CARTE 1 » PRESENTEES LORS DU SECOND TEST SUR L'INDICE DE QUANTITE DE COULEURS DESAGREABLES



carte 2.a

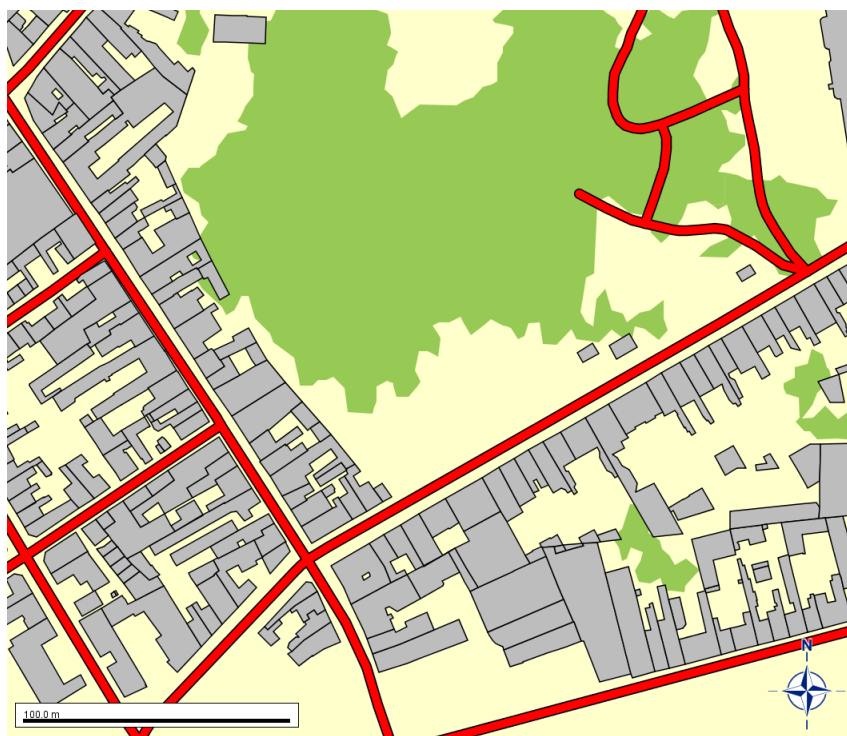
Indice de QCD : 0.42

2 : 43 %

1 : 43 %

0 : 9 %

-1 : 3 %



carte 2.b

Indice de QCD : 0.9

2 : 56 %

1 : 40 %

0 : 3 %



FIGURE 113 LES TROIS VERSIONS DE LA « CARTE 2 » PRESENTÉES LORS DU SECOND TEST SUR L'INDICE DE QUANTITE DE COULEURS DESAGREABLES

Les couleurs utilisées dans les cartes 1.a et 1.b (Figure 112) conduisent les testeurs à juger majoritairement ces cartes comme agréables. L'appréciation est inversée lorsqu'une des couleurs présente dans au moins 20% de la carte est remplacée par un vert fluo dans 1.c (Figure 112). Il peut donc être conclu que le vert fluo est jugé désagréable et que l'emploi d'une couleur désagréable engendre un inconfort visuel.

Le sous-test de la carte 2 nous permet d'arriver aux mêmes conclusions que celles du premier sous-test (couleur désagréable, inconfort visuel lié à cette couleur désagréable) en utilisant un vert grisé dans la carte 2.c (Figure 113).

Ce test confirme donc l'inconfort ressenti par les lecteurs de cartes géographiques (lorsqu'elles sont affichées sur un écran) vis-à-vis de certaines couleurs, en particulier les couleurs fluo et les couleurs foncées et grisées. Les valeurs calculées de l'indice reflètent cet inconfort visuel lorsque cet indice est correctement paramétré, c'est-à-dire que la liste des couleurs désagréables utilisée pour le calcul de cet indice est pertinente. Un autre processus indépendant devra donc être mené en vue de déterminer quelles sont exactement les couleurs qui causent cet inconfort visuel et à quel degré pour chacune.

e) Indice de contraste de couleurs :

Rappel : L'indice de contraste de couleurs permet de déterminer la qualité du contraste de couleurs entre les différentes couches d'une carte.


Il s'agit ici de vérifier que le contraste de couleurs est perçu par les testeurs, et que l'amélioration de l'indice de contraste de couleurs correspond bien à une amélioration de la visibilité des objets cartographiques pour ces testeurs.

Deux tests ont été réalisés pour l'indice de contraste de couleurs.

Dans le premier test, deux cartes sont présentées aux testeurs (Figure 114). Dans la première carte les symboles « bâtiments » sont représentés en gris clair ce qui donne un faible contraste avec les symboles voisins. Dans la deuxième carte ces mêmes symboles « bâtiments » sont représentés en gris foncé ce qui donne un meilleur contraste avec les symboles voisins. Dans les deux cartes aucune bordure n'est appliquée.

Il est par la suite demandé aux testeurs de choisir la carte la plus lisible.

Le tableau suivant (Figure 114) montre les deux cartes de ce test, l'indice de contraste de couleurs pour chacune d'entre elles, ainsi que les réponses des testeurs en gras.

	<p>Indice contraste de couleurs : 0.6</p> <p>Nombre de testeurs ayant choisi cette carte comme celle la plus lisible : 4 parmi 32</p>
---	--

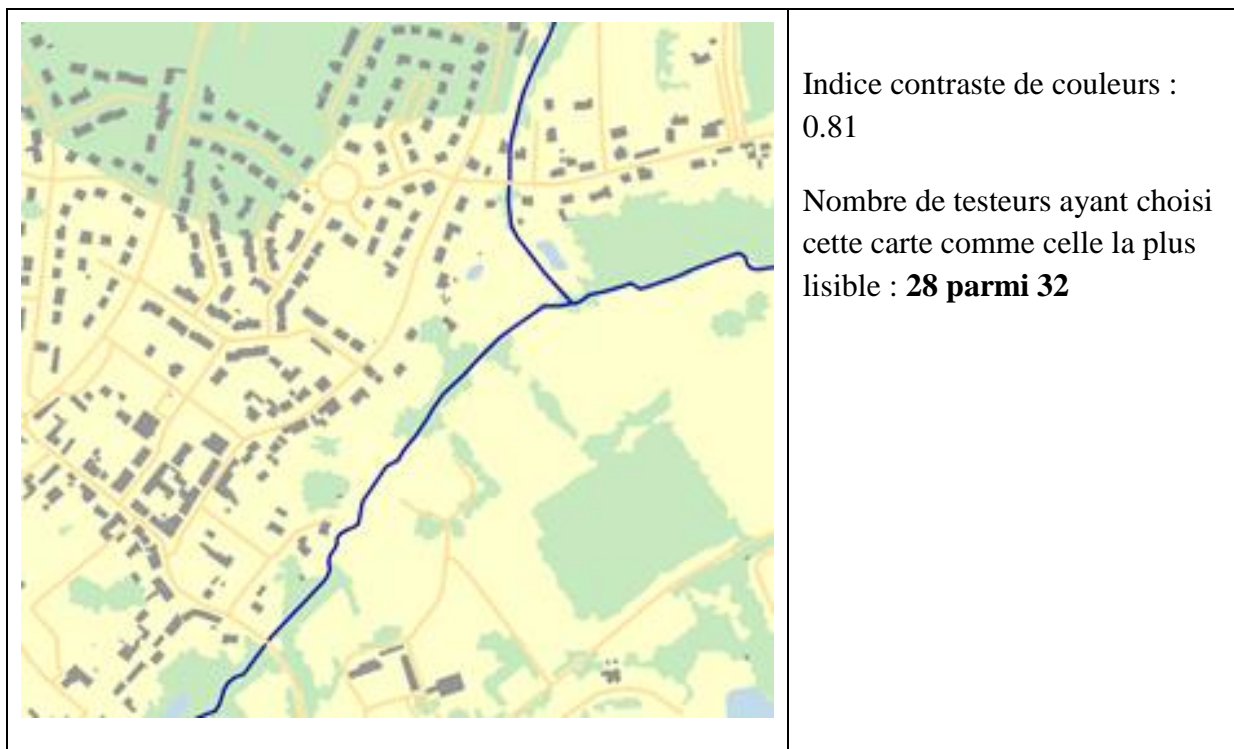


FIGURE 114 LES DEUX CARTES PRESENTEES LORS DU PREMIER TEST DE L'INDICE DE CONTRASTE DE COULEURS

Ici, les couleurs des objets ont été changées (sans ajout de bordure) ce qui conduit l'indice de contraste à varier de 0.6 à 0.8 ; la lisibilité des objets vue par les lecteurs varie également dans le même sens.

Le deuxième test présente deux cartes différentes sur lesquelles la couche « végétation » et la couche « hydrographie » sont représentées avec des couleurs faiblement contrastées (Figure 115). Dans la seconde carte, une bordure noire est rajoutée à la couche hydrographie.


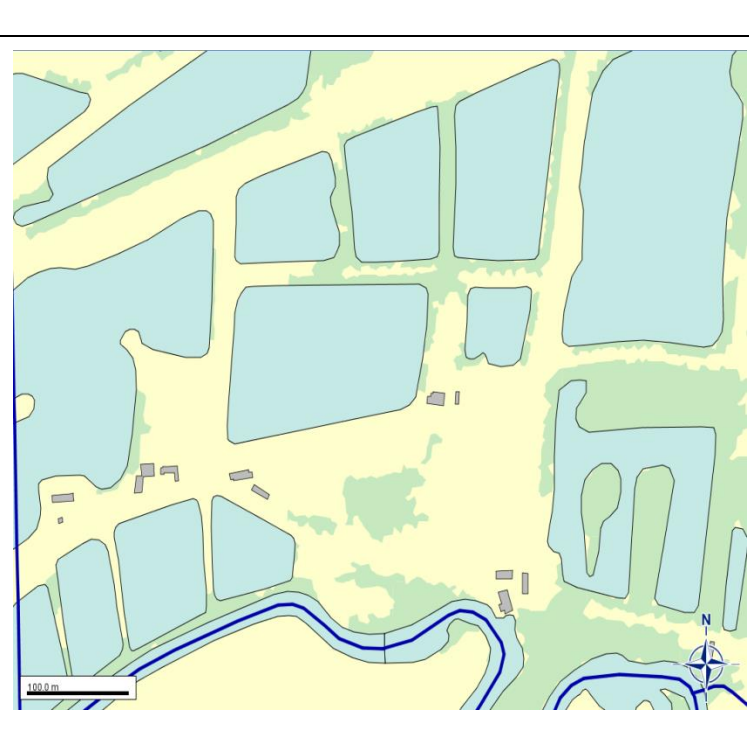
	<p>Indice de bordure : non pertinent Indice de contraste de couleurs : 0.43</p>
	<p>Indice de bordure : 0.9 Indice de contraste de couleurs : 0.5</p>

FIGURE 115 DEUX VERSIONS D'UNE MEME CARTE (AVEC ET SANS BORDURE) PRESENTEES LORS DU TEST DE L'INDICE DE CONTRASTE DE COULEURS

Il est ensuite demandé aux testeurs si la similarité des couleurs des surfaces d'eau et de la végétation les gêne quant à la reconnaissance des symboles. Les résultats ont été les suivants :

- Carte 1 (sans bordure) : me gêne beaucoup (28%), me gêne un peu (63%), ne me gêne pas du tout (9%).
- Carte 2 (avec bordure) : me gêne beaucoup (22%), me gêne un peu (34%), ne me gêne pas du tout (44%).

Ici, une bordure est ajoutée, ce qui conduit l'indice de contraste à varier de 0.43 à 0.5 alors que l'appréciation des testeurs varie de manière plus sensible : 9% ne sont pas gênés par le faible contraste en l'absence de bordure, ce taux monte à 44% quand une bordure est rajoutée.

Le test démontre donc que les lecteurs de cartes sont sensibles au changement de contraste de couleurs, ainsi qu'à la présence ou non de bordures lorsque ce contraste est faible. D'autre part, la valeur de l'indice de contraste de couleurs reflète pour chaque carte, le ressenti des lecteurs vis-à-vis de ce contraste de couleurs. À savoir, dans le deuxième cas une amélioration du ressenti des lecteurs, qui se traduit par une amélioration de la valeur de cet indice (indice qui varie de 0.43 à 0.5) est obtenue grâce à l'ajout de bordure. Cependant, le ressenti des testeurs reste « moyen » (44% ne sont pas gênés par le faible contraste contre 56% qui sont plus ou moins gênés), ce qui correspond à la valeur « moyenne » de l'indice (0.5).

Le deuxième test nous dit aussi que l'indice de contraste de couleurs n'a pas correctement reflété l'inconfort des lecteurs éprouvé vis-à-vis de la première carte. En effet, seuls 9% ont déclaré ne pas être gênés par la similarité des couleurs de l'hydrographie et de la végétation, contre 91% qui sont plus ou moins gênés. Suite à une série de tests plus approfondis, une modification de l'algorithme de calcul pourrait être envisagée en vue de traduire de manière plus fiable le ressenti des lecteurs de cartes.

f) Test de combinaison des anomalies :

Dans ce test final, une carte qui présente plusieurs anomalies (objets très petits, problèmes de superposition, problèmes de contrastes, symboles linéaires très fins) a été montrée aux testeurs puis il leur a été demandé d'identifier le problème qui les dérangeait le plus (Figure 116).

Les résultats récoltés sont les suivants :

Quatre testeurs (12.5%) ont estimé que les problèmes de superposition étaient ceux qui les gênent le plus.

Sept (22%) ont estimé que la petite taille des bâtiments est le problème le plus important.

La majorité, 21 soit 63% des testeurs, estime que le faible contraste des routes avec les objets voisins (en particulier le fond de la carte) est ce qui rend la carte peu lisible. Parmi ces derniers, 2 personnes ont également indiqué que la finesse des routes a autant d'impact que le faible contraste dans la mauvaise visibilité de ces routes.



FIGURE 116 DERNIERE CARTE PRESENTEE LORS DU TEST DES INDICES DE VISIBILITE, ET QUI POSSEDE PLUSIEURS ANOMALIES

Il s'avère donc que l'amélioration de la visibilité des objets linéaires, en particulier ceux qui font partie du thème « Routes » est prioritaire par rapport à l'amélioration des autres anomalies, même si ces dernières sont flagrantes. La plupart des lecteurs interrogés pensent ainsi qu'un mauvais contraste de couleurs affecte plus la lisibilité d'une carte que la dimension réduite des objets (linéaires ou surfaciques). Ceci est à prendre en compte dans le moteur d'amélioration de la visibilité des objets comme une règle ainsi qu'une condition d'arrêt si la valeur maximale de tous les indices ne peut être atteinte simultanément en un nombre raisonnable d'itérations (nombre défini à l'avance par l'auteur de la carte).

5.3. TEST DE VALIDATION DES ALGORITHMES D'AMELIORATION

L'objectif de ce test est double : d'un côté vérifier que les algorithmes d'améliorations de la représentation des objets améliorent effectivement les valeurs de ces indices et que cette amélioration est ressentie par les lecteurs de la carte ; et d'un autre côté dégager des seuils de représentation (notamment pour les bordures) à ne pas dépasser dans un sens ou dans l'autre pour ne pas dégrader la visibilité des objets concernés par cette représentation.

Ce test s'appuie sur trois cartes différentes. Pour chaque carte, dans une première étape, les différents indices sont calculés pour permettre l'évaluation de la visibilité des objets. Dans une deuxième étape, le modèle détermine quelles modifications doivent être apportées en priorité. Dans une troisième étape, une série de légendes (une centaine) a été générée en faisant varier simultanément trois paramètres :

- la largeur des objets linéaires (5 valeurs possibles),
- l'épaisseur des bordures (5 valeurs possibles),
- les couleurs (4 valeurs possibles).

Parmi les cartes générées, un sous-ensemble de celles-ci (32 cartes dans le premier test, 42 cartes dans le deuxième) a été choisi pour être présenté aux testeurs. Ces derniers devraient sélectionner dans chaque sous-ensemble pour chaque carte initiale, trois cartes qu'ils considèrent les meilleures sur le critère de visibilité des objets.

Ici, un échantillon de 22 personnes a effectué ce test sur une période d'une semaine dans des conditions d'environnement équivalentes à celles du premier test (même écran, même luminosité, même position, même heure de la journée). Pour chaque personne, ce test durait entre 10 et 20 minutes.

Ces 22 personnes ont un niveau en cartographie entre intermédiaire et confirmé.

Le test a été construit sur la même plateforme web locale que celle du premier test, les réponses des testeurs ont été enregistrées sur une base MySQL de la même manière que le premier test également.

Les résultats sont présentés par carte initiale.

a) Carte initiale 1 :

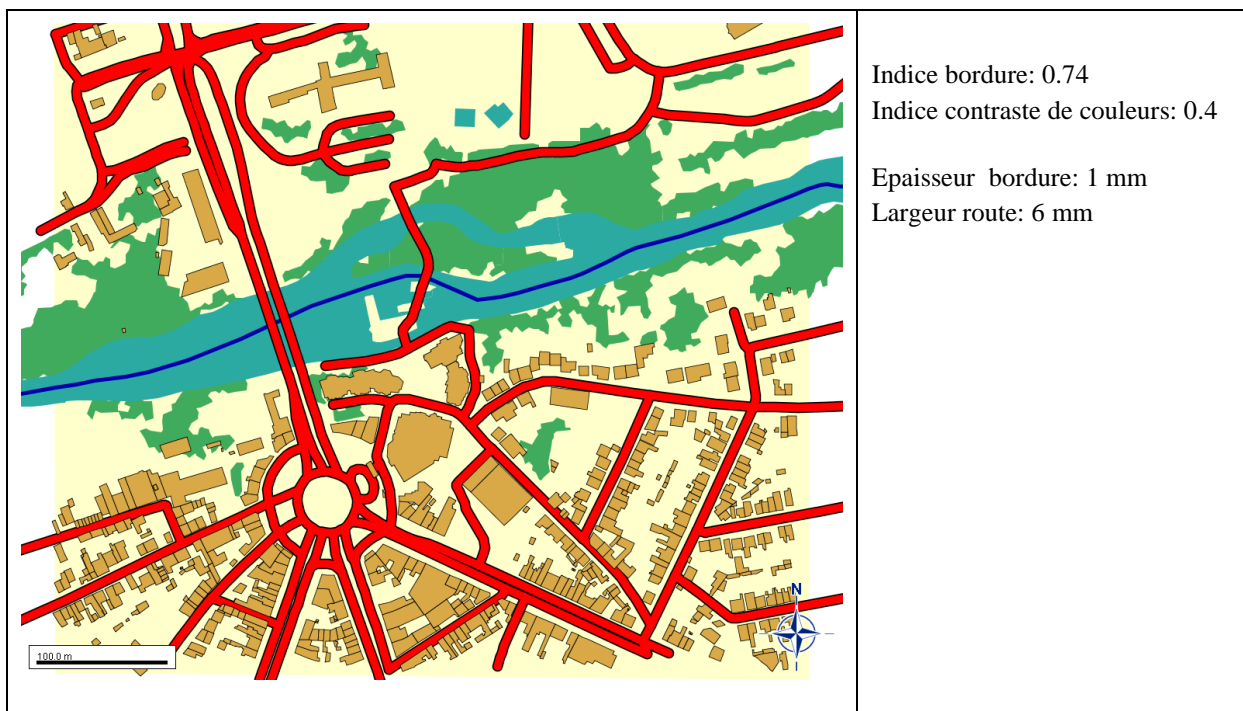
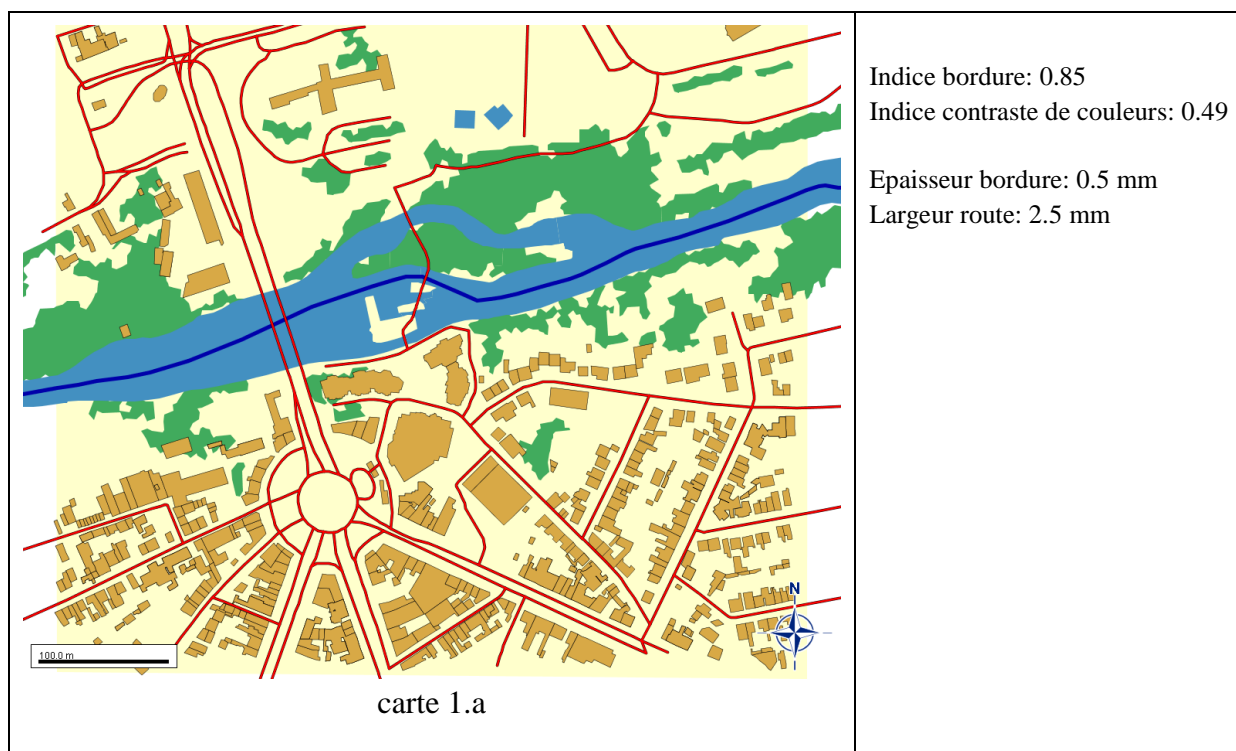


FIGURE 117 CARTE INITIALE N°1

Le principal problème de cette carte (Figure 117) est (1) le faible contraste de couleurs entre le cours d'eau et la végétation ainsi que (2) la large épaisseur des routes. À partir de cette carte initiale, 33 cartes ont été générées automatiquement et présentent chacune des modifications sur une ou plusieurs représentations d'objets. Ces modifications comprennent des améliorations des erreurs relevées par l'algorithme, ainsi que des variations de l'épaisseur des bordures et de l'épaisseur des objets linéaires. Ces variations seront utiles comme une première étude pour dégager des seuils de représentations pour l'épaisseur des bordures qui soient jugés satisfaisants pour les lecteurs.

Trois cartes modifiées obtenues à partir de cette carte initiale 1 ont été choisies par les testeurs (Figure 118). Ces trois cartes ont la particularité d'avoir des épaisseurs de bordures similaires : 0.5 mm (sur une échelle de variations allant de 0 à 2 mm par pas de 0.5 mm). Les épaisseurs des objets linéaires sont également proches : 4 mm pour deux d'entre elles et 2.5 mm pour la troisième (sur l'échelle de variation suivante : 0.5 mm, 1 mm, 2.5 mm, 4 mm, et 6 mm).



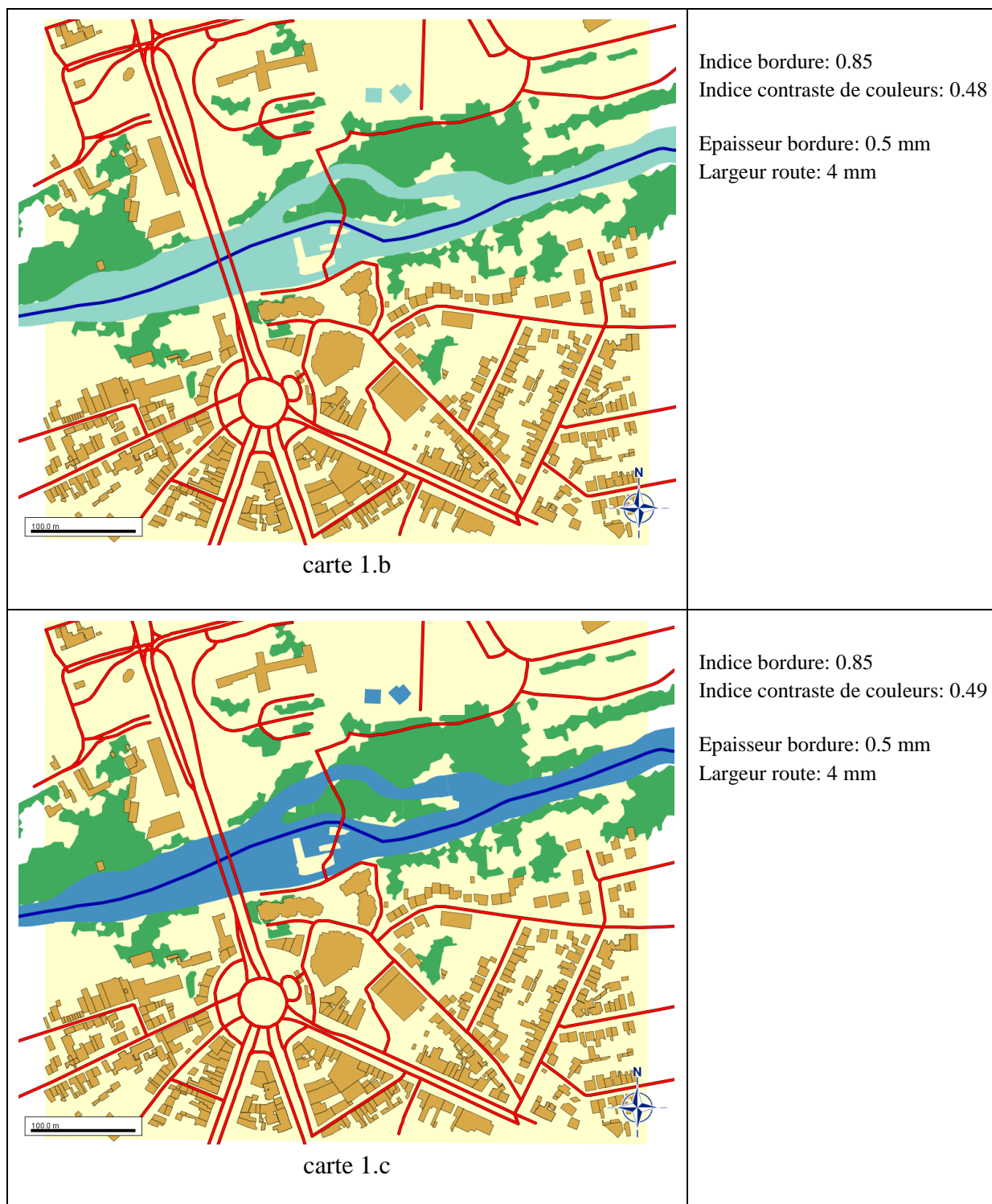


FIGURE 118 LES TROIS CARTES LES PLUS CHOISIES PAR LES TESTEURS POUR LA CARTE INITIALE 1

b) Carte initiale 2 :

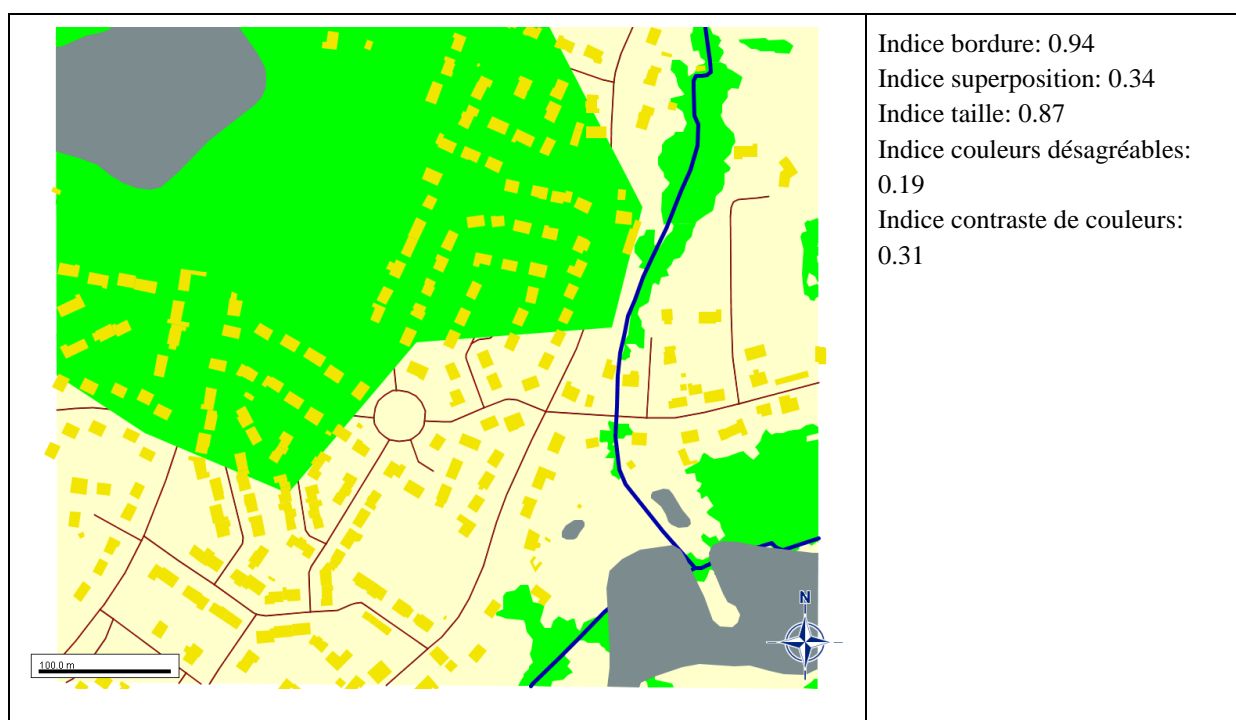
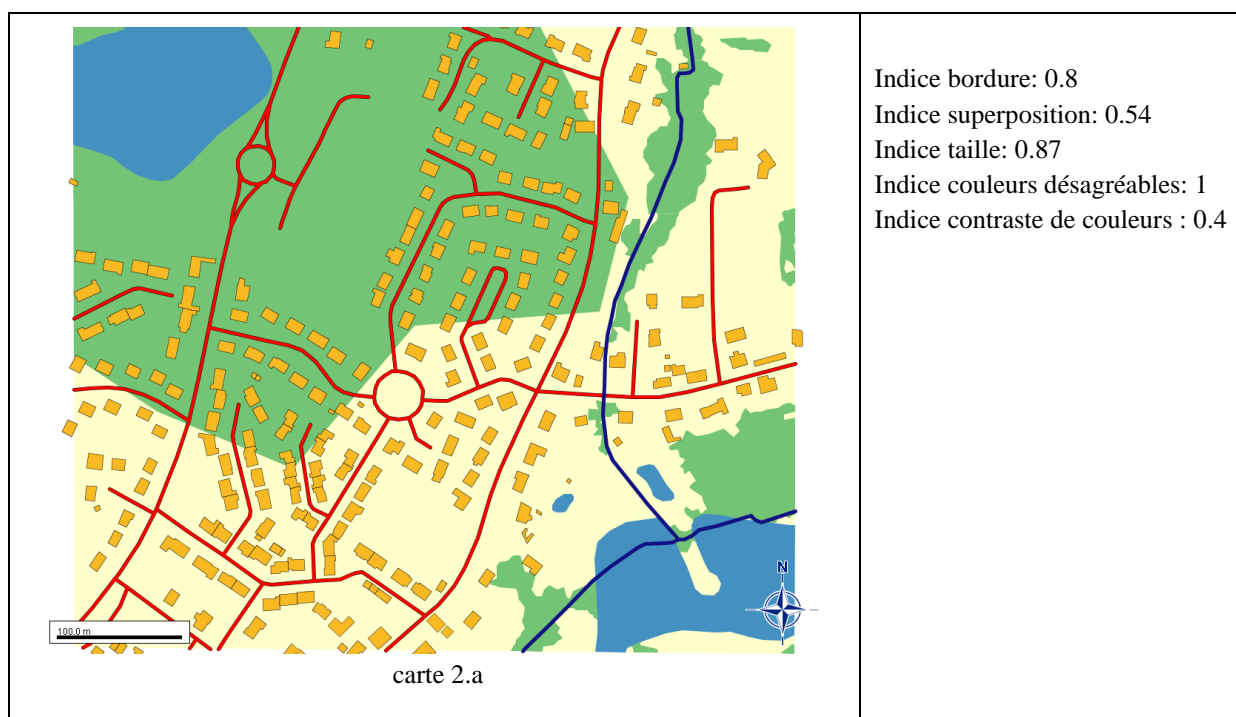


FIGURE 119 CARTE INITIALE N° 2

Plusieurs problèmes peuvent être relevés pour cette carte (Figure 119) : (1) l'ordre de superposition des couches n'est pas correct (des couches surfaciques sont dessinées au-dessus de couches linéaires) ; (2) une grande quantité de couleurs vives ; (3) un faible contraste entre les bâtiments et le fond de la carte.

Trois cartes modifiées ont été choisies par les testeurs (Figure 120) :



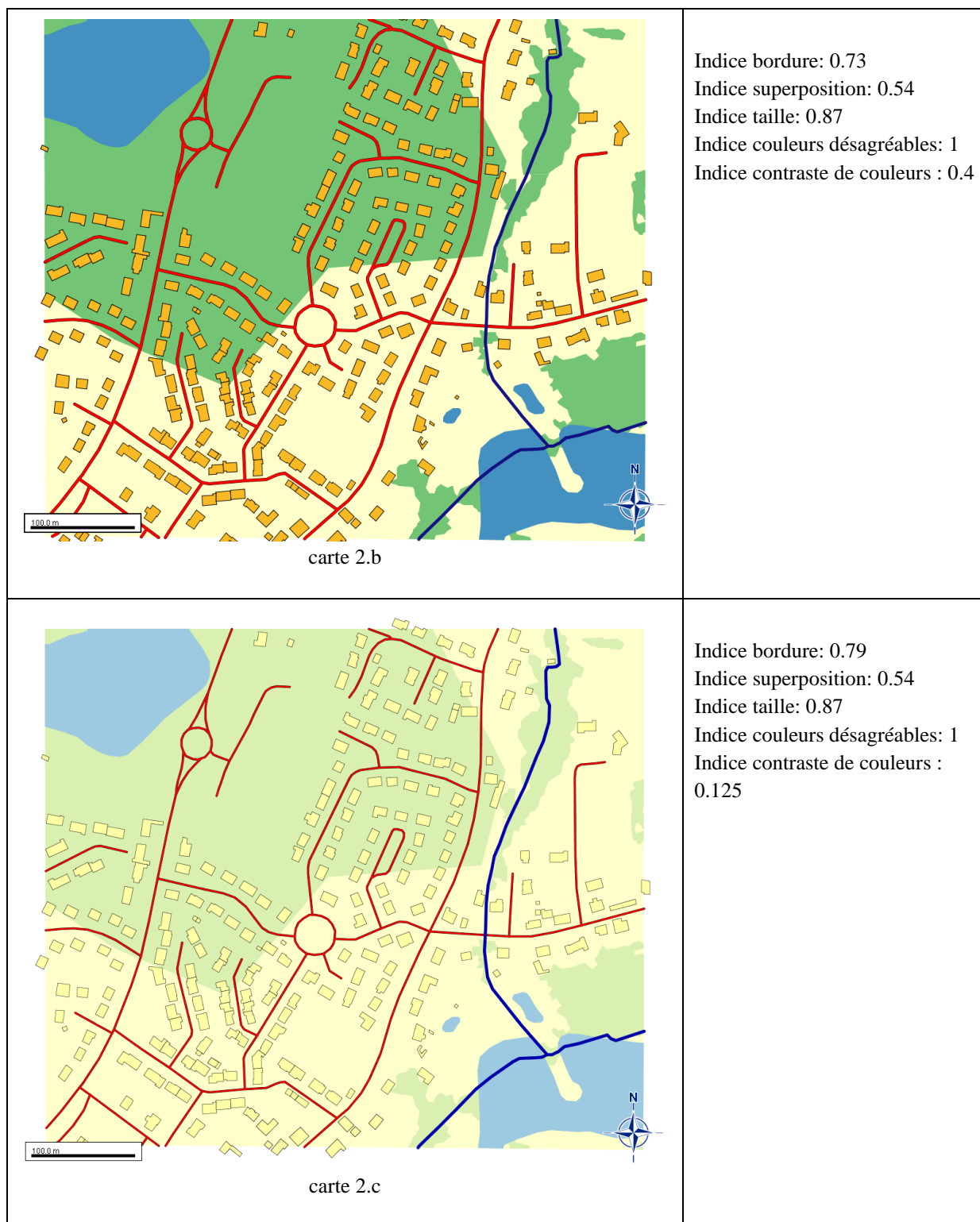


FIGURE 120 LES TROIS CARTES LES PLUS CHOISIES PAR LES TESTEURS POUR LA CARTE INITIALE 2

Le point commun entre ces trois cartes est la présence de bordures sur les bâtiments. La plupart des testeurs ont expliqué que cette bordure permet de garder, pour les symboles « bâtiments », un repère visuel constant sur toute la carte que ce soit lorsque les bâtiments sont au-dessus de la végétation ou au-dessus du fond.

Un point intéressant est à relever. Les testeurs ont également choisi la 3^{ème} carte parmi celles qu'ils préfèrent malgré un indice de contraste très faible. Cet indice est faible car les contrastes de couleurs entre la végétation et le fond d'une part, et les bâtiments et le fond d'autre part, sont très faibles. Les testeurs ont expliqué ici que le faible contraste de couleurs entre les bâtiments et le fond est compensé par la présence de bordures, et que le faible contraste de couleurs entre la végétation et le fond n'est pas gênant car la couche « végétation » n'est pas très importante pour eux, contrairement à la couche « route ».

c) Carte initiale 3 :

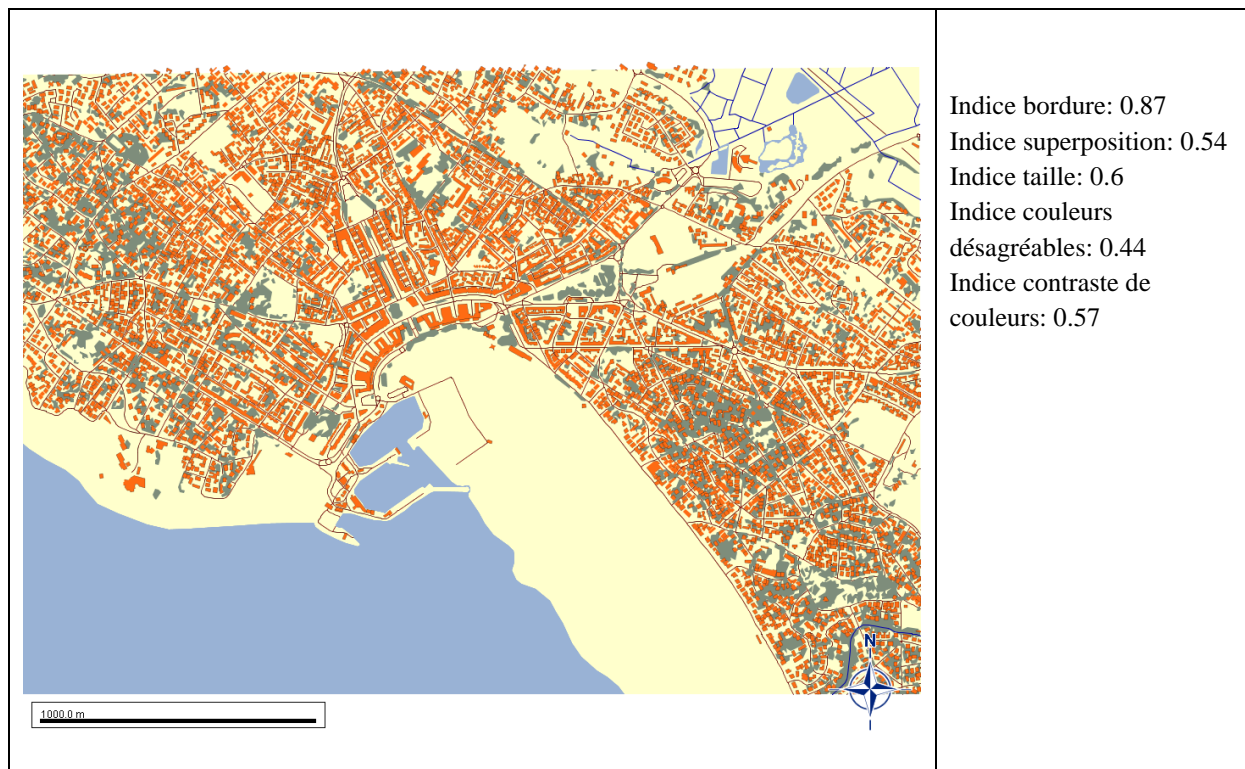
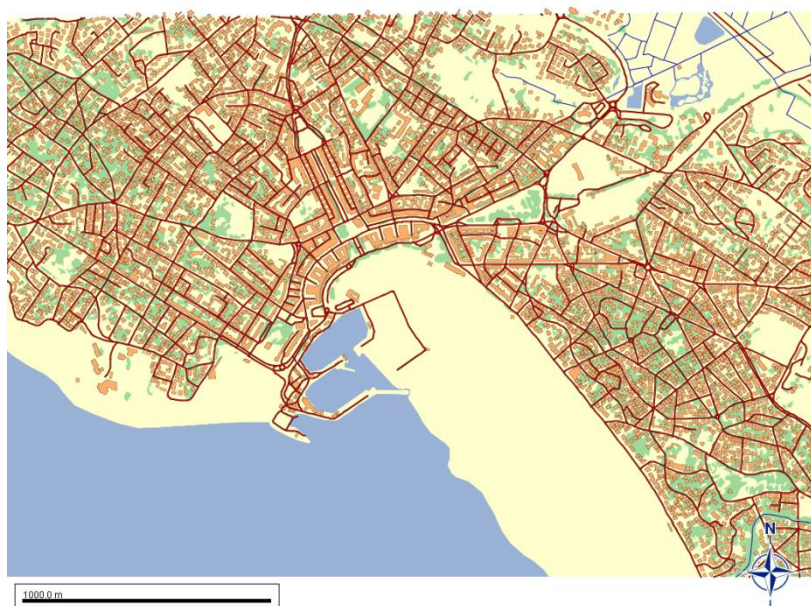


FIGURE 121 CARTE INITIALE N° 3

Les problèmes de cette troisième carte (Figure 121) sont : (1) une forte présence d'objets de petites tailles, (2) la faible épaisseur des routes, (3) la couleur des végétations très grisée.

Pour ce test, 3 cartes ressortent des choix des testeurs (Figure 122) :



Indice bordure: 0.8
 Indice superposition: 0.74
 Indice taille: 0.66
 Indice couleurs désagréables: 1
 Indice contraste de couleurs : 0.53



Indice bordure: 0.8
 Indice superposition: 0.74
 Indice taille: 0.66
 Indice couleurs désagréables: 0.93
 Indice contraste de couleurs : 0.53

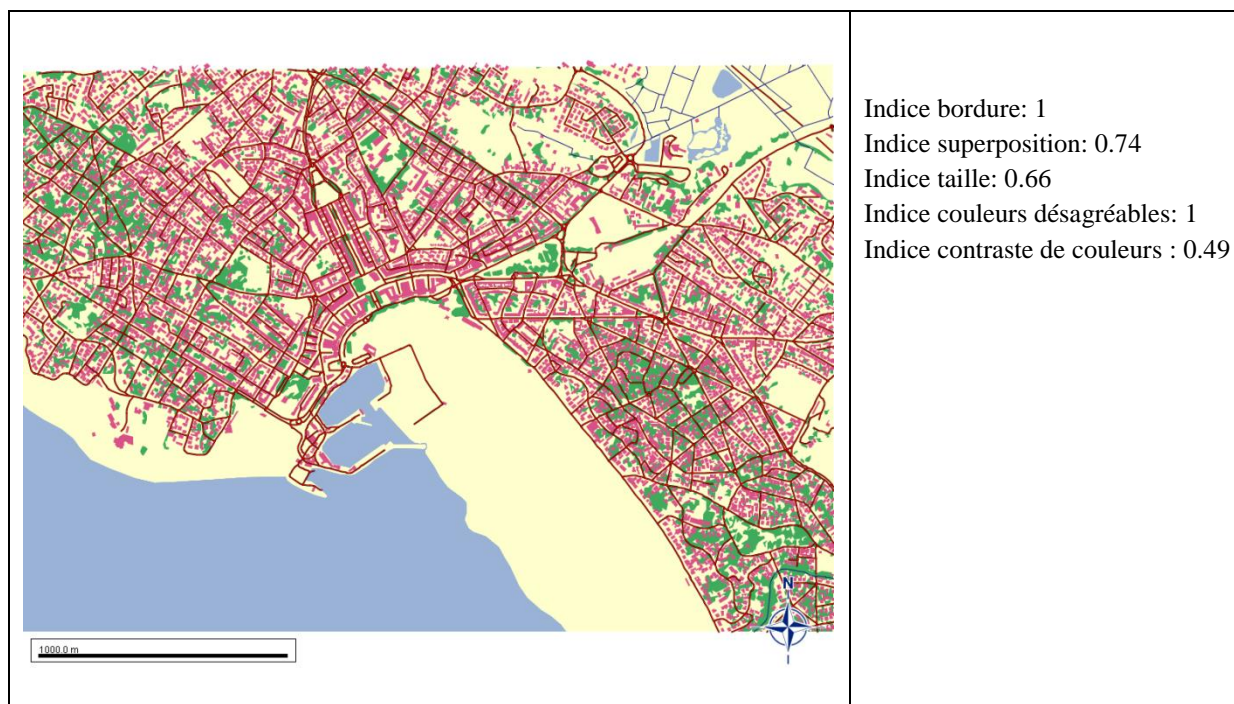


FIGURE 122 LES TROIS CARTES LES PLUS CHOISIES PAR LES TESTEURS POUR LA CARTE INITIALE 3

Le point commun de ces trois cartes est l'épaisseur des signes linéaires qui est plus large que dans la carte initiale, ce qui fait ressortir les routes qui deviennent plus visibles. La couleur de la végétation est très proches sur les trois cartes et correspond à deux nuances de vert « conventionnelles » utilisées pour le thème de végétation.

Dans les deux premières cartes, les testeurs ont choisi d'avoir des bâtiments contrastés avec la route mais auxquels est rajoutée une bordure pour contraster avec le fond. Dans la troisième carte, la bordure est supprimée mais la couleur des objets est modifiée pour être plus contrastée avec le fond et moins contrastée avec la route.

5.4. CONCLUSION SUR LES TESTS

Suite à la proposition du modèle et au développement d'un prototype, nous avons réalisé ces deux tests de validation. Il ressort ainsi de ces deux tests que les indices proposés sont effectivement pertinent quant à la perception visuelle des lecteurs d'une carte géographique. Nous pouvons aussi conclure que les algorithmes de calcul des valeurs de ces indices sont, dans l'ensemble, cohérents avec le ressenti des testeurs vis-à-vis de la représentation graphique des objets cartographiques étudiés lors de ces tests. Les valeurs sont correctement ordonnées.

D'un autre côté, des améliorations peuvent être entreprises pour définir les valeurs acceptables de celles qui posent problèmes, notamment pour l'algorithme de l'indice de contraste de couleurs. De même, d'autres indices peuvent être rajoutés à la liste actuelle, comme par exemple un indice de respect de règles conventionnelles de symbolisation.

CONCLUSION

Dans ce travail nous avons proposé un modèle d'évaluation et d'amélioration de la visibilité des objets cartographiques sur une carte géographique conçue par un concepteur non-expert en cartographie. Le but de notre recherche est donc de proposer un modèle permettant d'obtenir une carte plus lisible et plus compréhensible par ses lecteurs.

1. ETUDE

Dans la partie A nous avons d'abord réalisé une étude bibliographique sur la cartographie en général, la géomatique, et la géovisualisation. Nous avons pris en exemple de nouveaux outils qui permettent de lire, de construire, et d'exploiter des cartes géographiques, comme le Géoportail, OpenStreetMap, ou encore Foursquare.

Suite à cela nous avons relevé des problèmes qui peuvent survenir lors de la création de cartes par des personnes qui ne sont pas des experts en cartographie. Ces problématiques sont les suivantes :

- **L'hétérogénéité** : plusieurs données peuvent provenir de sources différentes et risquent donc ne pas être à la même échelle ou avoir des symbolisations peu cohérentes.
- **La superposition et l'opacité des objets** : deux problèmes sont possibles ici. Le premier lorsque des objets opaques (non transparents) de grandes surfaces recouvrent d'autres objets de plus petite surface; ces derniers seront donc invisibles ou peu visibles au lecteur. Le deuxième, lorsque l'auteur de la carte ne respecte pas l'ordre de couches conventionnel qui consiste à afficher les ponctuels au-dessus des linéaires, eux-mêmes au-dessus des surfaciques.
- **Le contraste de couleurs entre objets voisins** : Lorsque deux objets voisins de thèmes différents sont représentés par des couleurs proches et donc faiblement contrastées, des erreurs de reconnaissance et donc de lecture de ces objets peuvent avoir lieu.
- **L'utilisation de couleurs désagréables en grande quantité** : Certaines couleurs, lorsqu'elles sont utilisées en grande quantité, peuvent causer une gêne lors de la lecture de la carte. Ces couleurs (grisées, très vives, ou fluo) sont considérées comme désagréables.
- **La présence d'objets de petites tailles** peut rendre difficile la reconnaissance des thèmes de ces objets ce qui peut causer des erreurs d'interprétation de la carte.
- **L'utilisation de bordures épaisses**, en particulier sur les objets de petite taille, peut recouvrir ces objets et rendre difficile leur lecture.

- **Le non-respect de conventions de symbolisation** quant à l'utilisation de la couleur sur certains thèmes (vert pour la végétation par exemple).

2. APPORT

Cette décomposition nous a mené à proposer un ensemble d'indicateurs de visibilité (appelés aussi indices de visibilité), chacun d'entre eux rend compte d'un aspect visuel en particulier. Ces indices sont :

- **L'indice de superposition** qui caractérise le taux de chevauchement des objets de la carte pour un ordre donné d'affichage des couches.
- **L'indice de taille** qui permet de déterminer si le nombre d'objets de petite surface difficilement distinguables présents sur la carte est élevé ou non.
- **L'indice de bordure** qui caractérise le taux de chevauchement des objets de la carte par leurs bordures.
- **L'indice de contraste de couleurs** qui permet de déterminer la qualité du contraste de couleurs entre les différentes couches d'une carte.
- **L'indice de couleurs désagréables** qui permet de déterminer et de faire ressortir les couleurs très visibles et/ou présentes en grande quantité sur la carte et ainsi d'éviter l'abondance de couleurs menant à l'inconfort visuel telles que les couleurs fluorescentes, les couleurs vives, les couleurs grisées, ou les couleurs très foncées.

La valeur de ces indices (comprise entre 0 et 1) permet d'avoir une évaluation objective des éventuelles erreurs de symbolisation. La combinaison de ces indices permet une évaluation globale de la visibilité des objets cartographiques dont d'éventuelles erreurs peuvent engendrer une mauvaise visibilité et par là une mauvaise lisibilité de la carte.

Le modèle conçu propose par la suite un ensemble de méthodes de modification de la symbolisation dans le but d'améliorer les valeurs des indices et donc d'améliorer la visibilité des objets cartographiques. Ces méthodes d'amélioration sont au nombre de quatre :

- **Réordonner les couches** pour avoir, d'abord, une représentation conventionnelle (objet ponctuels au-dessus d'objets linéaires au-dessus d'objets surfaciques), ensuite, un taux de surface visible optimisé pour chaque couche.
- **Dilater et/ou fusionner les petits objets** afin de faciliter la lecture de la carte et limiter les mauvaises interprétations qui peuvent être dus à une erreur de reconnaissance d'un ou de plusieurs objets.
- **Modifier l'épaisseur des bordures** pour à la fois accentuer le contraste de couleurs si besoin est, et optimiser la surface visible des objets de petites tailles.

- **Modifier des couleurs** dans le but d'optimiser le contraste de couleurs entre objets voisins et de réduire la quantité de couleurs qui peuvent être considérées comme désagréables.

3. VALIDATION

Après avoir proposé ce modèle et après avoir détaillé les algorithmes utilisés par ce modèle, nous avons réalisé deux tests ; le premier a permis de valider la pertinence des indices et celle de leurs valeurs (et donc que les algorithmes sont corrects) ; le deuxième a permis de valider l'efficacité des méthodes d'amélioration. Les améliorations à apporter sont présentées en perspectives.

4. PERSPECTIVES

Suite à ce travail, plusieurs axes d'amélioration sont possibles qui concernent les indices de visibilité, les méthodes de modification de la symbolisation, et l'algorithme final d'amélioration des cartes.

4.1. AU NIVEAU DES INDICES

Concernant les indices, un affinement des seuils de visibilité doit être réalisé. En effet, les différents seuils utilisés dans ce travail sont issus de références théoriques et ne sont pas forcément adaptés au matériel d'aujourd'hui en particulier la résolution des écrans. Une étude doit donc être menée pour avoir une idée plus précise des seuils à utiliser pour :

- Considérer qu'un objet est « petit »
- Considérer qu'une bordure est « fine » ou « épaisse »
- Considérer qu'un symbole linéaire est « fin » ou « large »

Concernant les indices, toujours, il peut être intéressant d'en rajouter deux nouveaux :

- L'indice « règles conventionnelles » qui vérifie qu'une symbolisation choisie par l'utilisateur ou par le modèle respecte un ensemble défini de règles de représentations conventionnelles (couleur verte pour la végétation, couleur bleue pour l'hydrographie, etc).
- L'indice « signe-sens » qui vérifie que la légende utilisée respecte les relations entre les signes utilisés pour représenter les sens voulus. Ainsi cet indice vérifiera si les relations de différenciation, d'association, et d'ordre sont bien respectées par la symbolisation choisie afin que le message cartographique soit compréhensible par les lecteurs de la carte.

4.2. AU NIVEAU DES METHODES D'AMELIORATIONS

Ces deux nouveaux indices introduiront des modifications dans les algorithmes d'amélioration de la symbolisation :

- Une nouvelle technique d'amélioration qui proposera à l'auteur de la carte d'utiliser certaines variables visuelles afin d'exprimer telle ou telle autre relation.
- Construire une base de « couleurs conventionnelles » qui associera des couleurs à des thèmes. Cette base pourra ensuite être réutilisée par les algorithmes de modification de couleurs.

De même, il est possible de rajouter de nouvelles techniques de modification de la symbolisation pour améliorer la visibilité des objets :

- Variation du niveau d'opacité de certains signes pour permettre à ceux qui sont en-dessous d'être plus visibles. Cette recherche est certainement complexe parce que le mélange de 2 couleurs peut créer une nouvelle couleur qui brouillera le code général de lecture de la carte.
- Utiliser des bordures en pointillés pour représenter les parties des objets recouvertes par d'autres.

4.3. AU NIVEAU DE LA CONVERGENCE DE L'ALGORITHME FINAL

Enfin, une implémentation de l'algorithme final d'amélioration de la visibilité des objets doit être réalisée. Durant cette implémentation un choix doit être fait quant à la méthode de convergence à utiliser. Dans le modèle proposé, la méthode de convergence est itérative. En effet, on part d'une carte initiale (premier niveau) qu'on modifie pour avoir un ensemble de cartes (deuxième niveau). Si pour une de ces cartes le critère choisi, en l'occurrence les indices de visibilité, est amélioré alors on garde cette carte de ce (deuxième niveau) et on l'utilise pour construire un autre ensemble de cartes (troisième niveau). Dans notre cas, le critère d'amélioration est composé de cinq indices, donc il est parfaitement possible d'avoir, pour une carte initiale donnée, plus de cinq cartes améliorées. Le nombre de cartes améliorées par niveau peut donc facilement croître de façon exponentielle. C'est pourquoi nous avons introduit l'avis de l'utilisateur pour choisir, parmi les cartes de chaque niveau, une seule carte qui sera utilisée pour construire les niveaux suivants. Ceci diminuera le nombre de cartes intermédiaires ainsi que le temps de calcul par la machine. Nous pourrions améliorer notre méthode en s'inspirant du recuit simulé afin d'accepter des dégradations partielles mais de moins en moins fortes au cours des itérations.

Il est aussi possible d'utiliser d'autres méthodes telles que par exemple la méthode GRASP (Feo and Resende, 1989) qui à chaque itération (construction de cartes améliorées) élit les meilleures solutions selon le critère d'amélioration puis en choisit une aléatoirement parmi ces solutions qui sera utilisée pour construire les cartes suivantes. Le facteur aléatoire permettra d'avoir des résultats variés d'une exécution à une autre de l'algorithme tout en

conservant des résultats de bonne qualité vu que l'ensemble de départ ne contient que les bonnes cartes selon notre critère d'amélioration que sont les indices de visibilité.

Dans le modèle proposé, la condition d'arrêt est soit l'utilisateur décide qu'une carte en particulier correspond à ses besoins et interrompt donc l'algorithme, soit la valeur maximale est obtenue pour chaque indice (1).

Le principal inconvénient à cette proposition est qu'il est très facile de se retrouver dans une boucle infini. En effet, s'il est impossible d'atteindre les valeurs maximales pour chacun des indices et que l'utilisateur n'interrompt pas l'algorithme, celui-ci continuera de tourner indéfiniment.


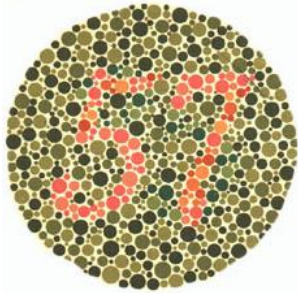
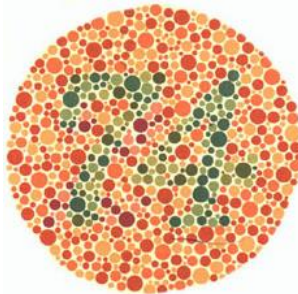
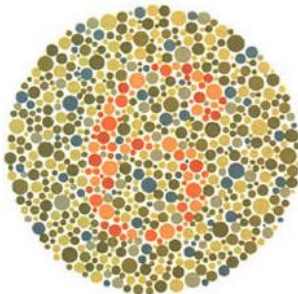
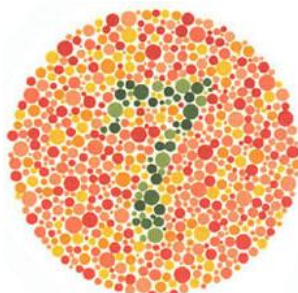


Il est alors possible d'introduire deux autres conditions d'arrêts pour pallier ce problème :

Un nombre d'itérations maximal que l'algorithme ne pourra pas dépasser. Par exemple il est possible de limiter l'exécution à 30 itérations. Arrivé à ce nombre, l'exécution s'arrêtera et l'utilisateur aura à choisir entre les cartes qui ont les meilleures valeurs d'indices obtenues jusqu'ici.

Un nombre d'itérations maximal lorsque la variation des indices ne dépasse pas un certain seuil par rapport à une itération donnée. Par exemple, si pour une itération (carte x), les cartes des 5 prochaines itérations ont des valeurs d'indices telles que leurs différences avec celles respectives de la carte x ne dépassent pas un seuil de 0.2, alors l'exécution est interrompue. Ce seuil (par exemple 0.2) et le nombre d'itérations maximal pourront être définis en prenant en compte la rapidité d'exécution de l'algorithme.

ANNEXE

Dans le chapitre B.5, deux tests de validations ont été présentés, précédés d'un « test de déficiences visuelles ». Il est issu du test chromatique de Shinobu Ishihara. Ce dernier est composé de 38 planches colorées et est divisé en 7 parties qui contiennent chacune plusieurs planches. Mais par soucis de faisabilité et de gain de temps afin de nous concentrer sur les deux autres tests, nous avons sélectionné une planche par partie. Ce qui nous fait un total de 7 planches (Tableau 5).

	Il faut lire le nombre 12.		Il faut lire le nombre 57.
	Il faut lire le nombre 74.		Il faut lire le chiffre 6.
	Il faut lire le chiffre 7.		Aucun nombre n'est inscrit sur cette planche.
	Il faut lire le nombre 26.		

TABEAU 5 PLANCHES SELECTIONNEES POUR LE TEST DE DEFICIENCES VISUELLES

BIBLIOGRAPHIE

Badard T. and Braun A. (2003), « Oxygene : An open framework for the deployment of geographic web services ». In 21st International Cartographic Conference (ACI/ICA), Durban, South Africa, August 10-16, 2003, pages 994_1004.

Balzarini R., Davoine P-A., Ney M., Billen R., Binard M., Hallot P., Donnay J-P. (2012), «Des variables didactiques pour éduquer l'analyse visuelle ». SAGEO 2012 - Conférence internationale de Géomatique et Analyse Spatiale, Nov 2012, Liège, Belgium. Unité de Géomatique, pp.30-34.

Bertin J. (1967), « Sémiologie Graphique : les diagrammes, les réseaux, les cartes ». Paris Mouton.

Bertin J. (1983), « A New Look at Cartography ». Taylor D., Graphic Communication and Design in Contemporary Cartography. Editions John Wiley & Sons Ltd, pages 69-85.

Board C. (1991), « Report of the Working Group on Cartographic Definitions ». ICA Newsletter, n°18.

Brewer C.A. (1997), « Evaluation of a Model for Predicting Simultaneous Contrast on Color Maps ». Professional Geographer. Volume 49, Issue 3 pages 280-294.

Brewer C.A. (2003), « A transition in improving maps: The colorbrewer example ». Cartography and Geographic Information Science, vol.30, no.2, pages 159-162.

Brychtova A. and Coltekin A. (2014), « An Empirical User Study for Mesuring the Influence of Colour Distance and Font Size in Map Reading Using Eye Tracking ». The cartographic journal.

Buard E. and Ruas, A. (2007), « Evaluation of colour contrasts by means of expert knowledge for on-demand mapping ». In: 23th ICA conference, Moscow.

Buard E. and Ruas A. (2009), « Processes for improving the colors of topographic maps in the context of Map-on-Demand ». 24th International Cartographic Conference (ICC'09), November 15th-21st, Santiago (Chile).

Bucher B., Brasebin M., Buard E., Grosso E. and Mustière S. (2009), « Geoxygene : built on top of the expertness of the french nma to host and share advanced giscience research results ». In International Opensource Geospatial Research Symposium 2009 (OGRS'09), 8-10 July, Nantes (France).

Caivano J. L. (1990), « Visual texture as a semiotic system ». Semiotica, 80(3/4), pages 239-252.

CFC (1990), Glossaire de cartographie. Le Monde des Cartes, Comité Français de Cartographie, Mars-Juin 1990.

Chesneau E. (2006), « Modèle d'amélioration automatique des contrastes de couleurs en cartographie ». Thèse de doctorat, Université de Marne La Vallée.

Chesneau E. (2007), « Etude des contrastes de couleurs pour améliorer la lisibilité des cartes ». In 8èmes rencontres ThéoQuant, 10-12 janvier, Besançon (France).

Christophe S. (2009), « Aide à la conception de légendes personnalisées et originales : Proposition d'une méthode coopérative pour le choix des couleurs ». Thèse de doctorat, Université de Marne La Vallée.

Christophe S. and Ruas A. (2009), « A process to design creative legend on demand ». 24th ICA conference, 14-19 November 2009, Chile.

Cuenin R. (1972), « Cartographie Générale Tome 1 Notions générales et principes d'élaborations ». Collection scientifique de l'Institut Géographique National, Editions Eyrolles.

Dominguès C. (2012), « Construire la légende d'une carte à l'aide d'une base de connaissance en cartographie ». 23es Journées Francophones d'Ingénierie des Connaissances (IC2012), pages 267-282.

Dominguès C., Christophe S. et Jolivet L. (2009), « Connaissances opérationnelles pour la conception automatique de légendes de cartes ». 20es Journées Francophones d'Ingénierie des Connaissances (IC 2009), pages 253-264, PUG.

Dykes J., MacEachren A.M. and Kraak M.J. (2005), « Exploring Geovisualization ». In: Exploring geovisualization, pages 3-19.

Fabrikant S.I. (2005), « Towards an understanding of geovisualization with dynamic displays ». Proceedings, American Association for Artificial Intelligence (AAAI) 2005 Spring Symposium Series: Reasoning with Mental and External Diagrams: Computational Modeling and Spatial Assistance. Stanford University, Stanford, CA, pages 6-11.

Fabrikant S. I. and Goldsberry K. (2005), « Thematic relevance and perceptual salience of dynamic geovisualization displays ». In Proceedings, 22th ICA/ACI International Cartographic Conference, A Coruña, Spain, Jul. 9-16, 2005.

Fabrikant S. I., Montello D. R., Ruocco M. and Middleton R. S. (2004), « The distance-similarity metaphor in network-display spatializations ». Cartography and Geographic Information Science (CaGis), 31(4):237_252.

Feo T.A. and Resende M.G.C. (1989), « A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem ». Operations Research Letters, 8, pages 67–71.

Fludd R. (1629-1631), « Medicina catholica ». Fitzerum, Francfort.

- Forsius A. S. (1611), « Physica Manuskript, 1611 ». Date de publication 1971.
- Godard V. (2010), « Cours de Cartographie ». Université Paris 8, 2010-2014.
- Goethe J. von (1810), «Traité des couleurs ». Edition originale : Die Farbenlehre. Traduction H. Bideau. Troisième édition Triades en 1990.
- Grelaud B. (2005), « Amélioration des cartes de risque : Analyse des contrastes de couleur définis par Itten ». Stage réalisé au laboratoire COGIT, IGN.
- Grosso E. (2011), « SEREDONA : A web service platform to integrate historical vector data into current reference frame ». e-Perimetron, vol. 6, n. 4, pp. 244--253
- Harrie L., Mustière S., Stuckenschmidt H. and Stigmar H. (2009), « Cartographic aspects of geoportals ». Presenting Spatial Information: Granularity, Relevance, and Integration, Workshop at COSIT'09, Aber Wrac'h (France).
- Harrie L., Toomanian A., Olsson P.-O., Mansourian A. and Pelesjo P. (2013), « Some methods to improve the cartography in view services ». Web Cartography for National SDIs.
- Ishihara S. (1917), « Tests for color-blindness ». Handaya, Hongo Harukicho.
- Itten J. (1967), « Art de la couleur ». Edition originale en 1961 : Kunst der Farbe. Traduction en français en 1967, puis en 2001. Ed. Dessain et Tolra.
- Itten J. (1985), « Art de la couleur ». Editions Dessain et Tolra, Paris.
- Jean G. (1989), « Langage de signes ». Gallimard, page 76.
- Jégou L. et Deblonde J-P. (2012), « Vers une visualisation de la complexité de l'image cartographique ». Cybergéo.
- Jiang B., Huang B. and Vasek V. (2003), « Geovisualisation for Planning Support Systems ». In: Planning Support Systems in Practice, Geertman, S., and Stillwell, J. (Eds.). Berlin: Springer.
- Jolivet L. (2009), « Characterizing maps to improve on-demand cartography - the example of European topographic maps ». Actes de la conference GISRUK, Royaume-Uni, Durham.
- Koffka K. (1935), « Principles of Gestalt Psychology ». New York : Harcourt, Brace & Co.
- Kohler W. (1947), « Gestalt psychology ». New York : Liveright.
- Kraak M. J. (2001), « Web maps and atlases ». In Kraak M. J., Broon A. (eds.), Web cartography. Developments and prospects, New York, Taylor & Francis.
- Kraak M. J. (2008), « Exploratory visualization ». Encyclopedia of GIS, Springer US, pages 301-307.

Landragin F. (2005), « Modélisation de la saillance visuelle et linguistique ». Sixième Colloque des Jeunes Chercheurs en Sciences Cognitives (CJCSC'05), Bordeaux, France.

MacEachren A. M. (1995), « How maps work: representation, visualization and design ». Reissues in 1995, then in 2004, The Guilford Press, New-York, USA.

MacEachren A.M. and Kraak M.J. (1997), « Exploratory cartographic visualization: advancing the agenda ». *Computers & Geosciences*, Volume 23, Issue 4, pages 335-343.

Mersey J. (1990), « Colour and Thematic Map Design : The Role of Colour Scheme and Map Complexity in Choropleth Map Communication ». *Cartographica*, 27, n° 3.

Monmonier M. (1991), « How to lie with maps ». University of Chicago Press.

Morrison J. L. (1974), « A theoretical framework for cartographic generalization with the emphasis on the process of symbolization ». *International Yearbook of Cartography*, 14, pages 115-127.

Mustière S. (2001), « Apprentissage supervisé pour la généralisation cartographique ». Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI.

Newton I. (1704), « Opticks : or a Treatise of the Reflexions, Refractions Inflexions and Colours of Light. Also Two Treatises of the Species and magnitude of Curvilinear Figures ». London.

Van Oort P.A.J., Kuyper M.C., Bregt A.K. and Crompvoets J. (2009), « Geoportals : An Internet Marketing Perspective ». *Data Science Journal*, Vol. 8, pages 162-181.

Palsky G. et Robic M.C. (1997), « Aux sources de la sémiologie graphique ». *Cybergéo*, Colloque 30 ans de sémiologie graphique, Paris.

Palsky G. (2003), « Eléments pour une histoire de la sémiologie graphique avant Jacques Bertin ». *Bulletin de l'Association des Géographes Français*, 2, pages 183-194.

Palsky G. (2005), « Séries d'articles : Carte, Carte choroplèthe ». *Hypergé*, Encyclopédie de géographie.

Raposo P. and Brewer C. A. (2011), « Comparison of topographic map designs for overlay on orthoimage backgrounds ». In 25th International Cartographic Conference, 3-8 July, Paris.

Robinson A. (1995), « Elements of cartography », Sixth Edition. John Wiley & Sons, Inc.

Robinson A. C. (2009), « Visual highlighting methods for geovisualization ». 24th International Cartographic Conference (ICC 2009), Santiago (Chile).

Rod J.K. (2004), « Cartographic Signs and Arbitrariness ». *Cartographica*, 39, n° 4, pages 27-36.

Ruas A. (1999), « Modèle de généralisation de données géographiques à base de contraintes et d'autonomie ». Thèse de doctorat, Université de Marne La Vallée, 1999.

Ruas A. (2004), « Le changement de niveau de détail dans la représentation de l'information géographique ». Habilitation à diriger des recherches spécialité sig, Université de Marne-la-Vallée, 2004.

Saussure F. (1916), « Cours de linguistique générale ». P-33.

Spiess E. (1995), « The need for generalization in a GIS environment ». In: GIS and Generalization : methodology and practice, Taylor & Francis (Eds), London (UK), pages 31-46.

Theeuwes J. (1992), « Perceptual selectivity for color and form ». In: Perception and Psychophysics, 51(6), pages 599-606.

Weger G. (1996), « Cartographie : La couleur ». Ecole Nationale des Sciences Géographiques.

Weger G. (1999), « Sémiologie graphique et conception cartographique ». Volume 1, Ecole Nationale des Sciences Géographiques.

Wertheimer M. (1924), « Über Gestalttheorie ». Symposion 1, 39-60.

Wertheimer M. (1944), « Gestalt theory » [english translation of "Über gestalttheorie" 1924/1925] ». Social Research, 11:78_99.

Wolfe J. M. and Horowitz T. S. (2004), « What attributes guide the deployment of visual attention and how do they do it ? ». Nature Rev. Neuroscience, 5:495_501.

Zanin C. et Trémélo M.L. (2003), « Savoir faire une carte. Aide à la conception et à la réalisation d'une carte thématique univariée ». Belin sup.

PUBLICATIONS

Bessadok F., Mustière S. et Ruas A. (2010), « Co-visualisation de données sur une carte. Aide à la cartographie de données multiples et hétérogènes sur un portail de données géographiques », Colloque International de Géomatique et d'Analyse Spatiale SAGEO'10, Toulouse, France.

Bessadok F. and Domingues C. (2011), « Automatic evaluation and improvement of map readability », 25th International Cartographic Conference (ICC2011), 2011 July, 2-8, Paris, France.

Bessadok F., Domingues C. et Ruas A. (2012), « Évaluation et amélioration automatique de la lisibilité de cartes », Journée de la recherche IGN 2012.

TABLE DES FIGURES

Figure 1 Structure conventionnelle d'une carte géographique.....	23
Figure 2 Schéma illustrant le découpage d'une carte par des méridiens et des parallèles (Wikipedia).....	25
Figure 3 Schéma illustrant la projection azimutale stéréographique	26
Figure 4 Projection azimutale équivalente de Lambert, équatoriale sur le méridien central .	26
Figure 5 Schéma illustrant la projection conique	27
Figure 6 Projection conique conforme de Lambert	27
Figure 7 Schéma illustrant la projection cylindrique	28
Figure 8 Projection de Mercator	28
Figure 9 Des symboles ponctuels dans la légende de la carte Top 25 de l'IGN	31
Figure 10 Des symboles linéaires dans la légende de la carte Top 25 de l'IGN.....	31
Figure 11 Des symboles surfaciques dans la légende de la carte Top 25 de l'IGN	32
Figure 12 Variables visuelles telles que définies par Jacques Bertin (Bertin, 1967)	33
Figure 13 variation de taille.....	33
Figure 14 variation de valeur.....	34
Figure 15 utilisation de la valeur (dans la couleur) pour traduire une relation d'ordre.....	34
Figure 16 Variation du grain (Godard, 2010).....	35
Figure 17 variation de la couleur.....	35
Figure 18 variation de la forme	35
Figure 19 variation de l'orientation.....	35
Figure 20 des symboles qui se ressemblent. De gauche à droite : Chapelle, Eglise, Calvaire (Légende IGN)	36
Figure 21 Spectre de la lumière perceptible par l'œil humain	37
Figure 22 Synthèse additive et couleurs primaires.....	38
Figure 23 Synthèse soustractive et couleurs primaires	38
Figure 24 L'activité en France en 2004 (source documentation du logiciel Arctique).....	39
Figure 25 Organisation spatiale des couleurs en cercle selon Aron Sigrid Forsius (En suédois, traduit en anglais).....	40
Figure 26 Traduction anglaise de la sphère de Aron Sigrid Forsius (1611).....	40
Figure 27 Organisation des couleurs en cercle selon Robert Fludd (1629-1631)	41
Figure 28 Cercle chromatique de Newton (1704)	42
Figure 29 Cercle chromatique de Johannes Itten et classification des couleurs (1967).....	42
Figure 30 Contraste maximal	43
Figure 31 Contraste atténué par l'ajout de blanc.....	43
Figure 32 Les deux couleurs à droite ont un contraste chaud-froid plus atténué que celui des deux couleurs à gauche qui ont un contraste plus fort	43
Figure 33 Les deux couleurs de gauche possèdent un plus fort contraste clair-obscur que ceux à droite.....	43
Figure 34 Différents niveaux de saturation d'une même teinte (orange mandarine).Une couleur terne (par exemple celle du milieu) peut paraître lumineuse si elle est mise à côté d'une autre couleur plus terne (deuxième à partir de la droite)	44

Figure 35 Représentation du contraste de quantité	44
Figure 36 Exemple de contraste simultané dans lequel les couleurs paraissent instables	44
Figure 37 Quelques exemples d'opérations de généralisation (Mustière, 2001)	45
Figure 38 Différentes représentations de la région de Rennes obtenues par généralisation ...	46
Figure 39 Un exemple d'utilisation de la transparence pour résoudre le problème de la superposition d'objets	49
Figure 40 La carte de la région de Gabès (Tunisie) sur le service Google Maps	51
Figure 41 La carte de la région de Gabès (Tunisie) sur le service OpenStreetMap	52
Figure 42 Le service « Where Is My Train », chaque lettre (A ou B) représente la position actuelle d'un train selon la grille d'horaires fournie par la RATP	53
Figure 43 Le service Open Signal représentant la qualité récoltée des réseaux téléphoniques sur une portion de la Turquie	54
Figure 44 Version 5 de Foursquare agrégeant les lieux par type	56
Figure 45 Modification des couleurs d'une carte pour respecter l'usage de couleurs conventionnelles	59
Figure 46 Extrait d'un cours d'Anne Ruas sur la généralisation	60
Figure 47 Tailles minimales de perception sur un écran cathodique (Spiess, 1995)	61
Figure 48 Les dimensions graphiques minimales perceptibles par l'œil humain (Weger, 1999)	62
Figure 49 Exemple de carte illisible à cause d'un trop grand nombre de données représentées	63
Figure 50 Exemples de lois gestaltiennes	65
Figure 51 Le cerveau parvient à repérer et comprendre les mots malgré le fait que leurs lettres soient mélangées	65
Figure 52 Les différentes relations entre les classes dans l'outil ColorBrewer. De gauche à droite : Exemple de relation séquentielle, Exemple de relation divergente, Exemple de relation qualitative	67
Figure 53 ColorBrewer 2.0. Exemple avec 7 classes et une gamme de Bleu-Violet (Brewer 2003)	68
Figure 54 Couleurs de la table de référence proposée par Chesneau (2006)	69
Figure 55 Contrastes selon les relations sémantiques entre les thèmes. (Christophe, 2009) d'après (Chesneau 2006)	70
Figure 56 Repositionnement des secteurs de couleurs du cercle chromatique principal selon les distances perçues de teinte et de valeur	71
Figure 57 Cartes proposées par le modèle de (Christophe 2009) en s'inspirant d'une palette de Van Gogh à gauche et d'une palette de Derain à droite	72
Figure 58 Formulaire qui interroge l'utilisateur sur ses préférences pour générer une carte et une légende adaptée d'après les travaux de (Jolivet 2009)	73
Figure 59 Un quartier de Paris sur lequel sont représentés le réseau routier, le réseau ferroviaire, les bâtiments, et l'hydrographie	75
Figure 60 Le même quartier de Paris sur lequel ont été rajoutés les risques de la crue du bassin de la Seine	76
Figure 61 La proximité des couleurs des bâtiments et de la végétation rend leur distinction difficile	77

Figure 62 La même emprise d'une région avec à droite une représentation des bâtiments sans aucune bordure et à gauche avec ajout de bordure.....	78
Figure 63 Diagramme d'état-transition du processus d'amélioration de la carte.....	80
Figure 64 Diagramme UML des concepts de base utilisés dans cette thèse	83
Figure 65 Diagramme UML représentant les 3 niveaux d'indices	85
Figure 66 Exemple de buffer (en rouge) qui englobe un objet graphique « château »	86
Figure 67 Les deux types de buffers. à gauche, un buffer simple (1ier type); à droite un buffer dit « précis » (2ième type) qui reproduit la forme initiale	87
Figure 68 Exemple illustrant trois types d'extrémités (de gauche à droite) droites, arrondies, carrées.....	87
Figure 69 Création de buffers (colonne centre et droite) d'objets initiaux (colonne gauche) ponctuels, linéaires, surfaciques, ou multiples	88
Figure 70 Exemple d'objets ponctuel et linéaire	89
Figure 71 Exemple de signes graphiques ponctuel et linéaire	89
Figure 72 Valeurs de surface obtenues selon l'utilisation de la méthode précise (à gauche) ou la méthode rapide (à droite). Objet « château » (Jean G., 1989).....	90
Figure 73 Calcul de surface d'un objet linéaire en le décomposant en deux sous-objets linéaires	91
Figure 74 Deux formes de représentation des extrémités des symboles linéaires	91
Figure 75 Les deux types de liaisons entre deux symboles linéaires : liaison par proximité, liaison par superposition.....	92
Figure 76 Ajout d'une bordure sur un objet	93
Figure 77 Les différents polygones utilisés lors du calcul de surface d'un objet et de sa bordure	94
Figure 78 Une carte avec un ordre de couches incorrect	95
Figure 79 Une carte qui contient plusieurs petits objets illisibles.....	99
Figure 80 Une carte ayant un rouge vif trop présent.....	101
Figure 81 Allure de la courbe des valeurs de l'indice de couleurs désagréables	102
Figure 82 Une carte présentant un faible contraste entre les bâtiments et le fond	104
Figure 83 Les cercles chromatiques définis au laboratoire COGIT	104
Figure 84 Carte illustrant la qualité de contraste entre objets voisins.....	106
Figure 85 Une carte ayant des objets avec une large bordure	108
Figure 86 Suppression de la bordure dans la partie droite pour alléger la carte	116
Figure 87 Exemple de carte avec modification de la couleur des bâtiments	120
Figure 88 Mécanisme de fusion des objets qui se superposent	123
Figure 89 Diagramme d'état-transition du processus d'amélioration de la carte.....	125
Figure 90 Exemple de carte initiale.....	128
Figure 91 Extrait de cartes générées à partir de la carte initiale de la figure 88	130
Figure 92 Influence des méthodes d'améliorations sur les indices	131
Figure 93 Interface de l'outil IndiceApplication	134
Figure 94 Menu du chargement des données et de l'évaluation de la visibilité.....	135
Figure 95 Historique d'exécution d'IndiceApplication avec les cartes évaluées ainsi que les indices de visibilité calculés et représentés sous forme graphique	135
Figure 96 Modèle de la légende tel que défini dans GeOxygene.....	136

Figure 97 Une carte est composée de données cartographiques représentées selon une légende. Cette carte est caractérisée par un ensemble d'indices	138
Figure 98 Schéma conceptuel des indices d'une carte géographique	138
Figure 99 Schéma conceptuel des améliorations de symbolisations sur une carte	139
Figure 100 Schéma conceptuel simplifié du système IndiceApplication.....	140
Figure 101 Planche numéro 1 issue du test d'Ishihara (il faut percevoir un « 12 » sur ce dessin).....	143
Figure 102 Deux cartes avec un ordre de superposition des couches différent	144
Figure 103 Deux cartes avec un ordre de superposition des couches différent	145
Figure 104 Deux cartes avec un ordre de superposition des couches différent	145
Figure 105 Deux cartes avec un ordre de superposition des couches différent, et une variation de la valeur de leurs indices de superposition très faible	146
Figure 106 Les trois cartes présentées lors du premier sous-test de l'indice de taille	148
Figure 107 La carte présentée lors du deuxième sous-test de l'indice de taille	149
Figure 108 Les trois cartes présentées lors du premier test relatif à l'indice de bordure.....	151
Figure 109 Les trois cartes présentées lors du deuxième test de l'indice de bordure : variation d'épaisseur de bordure et variation du contraste de couleurs.....	153
Figure 110 « Carte 1 » présentée lors du test de quantité de couleurs désagréables	155
Figure 111 « Carte 2 » présentée lors du test de quantité de couleurs désagréables.....	156
Figure 112 Les trois versions de la « carte 1 » présentées lors du second test sur l'indice de quantité de couleurs désagréables	158
Figure 113 Les trois versions de la « carte 2 » présentées lors du second test sur l'indice de quantité de couleurs désagréables	160
Figure 114 Les deux cartes présentées lors du premier test de l'indice de contraste de couleurs	162
Figure 115 Deux versions d'une même carte (avec et sans bordure) présentées lors du test de l'indice de contraste de couleurs	163
Figure 116 Dernière carte présentée lors du test des indices de visibilité, et qui possède plusieurs anomalies	165
Figure 117 Carte initiale n°1	166
Figure 118 Les trois cartes les plus choisies par les testeurs pour la carte initiale 1	168
Figure 119 Carte initiale n° 2	169
Figure 120 Les trois cartes les plus choisies par les testeurs pour la carte initiale 2	170
Figure 121 Carte initiale n° 3	171
Figure 122 Les trois cartes les plus choisies par les testeurs pour la carte initiale 3	173

TABLE DES ALGORITHMES

Algorithme 1 Algorithme simplifié du calcul de l'indice local de superposition de chaque couche.....	96
Algorithme 2 Algorithme simplifié du calcul de l'indice de superposition global d'une carte	97
Algorithme 3 Calcul de l'indice de taille global pour la totalité de la carte	100
Algorithme 4 Algorithme simplifié du calcul de l'indice d'utilisation de couleurs désagréables sur une carte	103
Algorithme 5 Algorithme simplifié du calcul de l'indice de contraste dans une carte	107
Algorithme 6 Algorithme simplifié du calcul des indices de bordure locaux et global pour une carte	109
Algorithme 7 Algorithme simplifié du réarrangement des couches selon la surface de leurs plus grands objets respectifs.....	111
Algorithme 8 Algorithme simplifié du réarrangement des couches selon leurs surfaces totales	112
Algorithme 9 Algorithme simplifié du réarrangement des couches selon la surface moyenne de leurs objets.....	113
Algorithme 10 Algorithme simplifié de la séparation des couches selon leur type d'implantation	113
Algorithme 11 Algorithme simplifié du réarrangement des couches selon la surface de leurs plus grands objets respectifs ainsi que selon la nature de leurs objets.....	114
Algorithme 12 Algorithme simplifié du réarrangement des couches selon la surface totale de leurs objets respectifs ainsi que selon la nature de leurs objets	114
Algorithme 13 Algorithme simplifié du réarrangement des couches selon la surface moyenne de leurs objets respectifs ainsi que selon la nature de leurs objets.....	114
Algorithme 14 Seuils minimaux de perception utilisés par les algorithmes de 15 à 19	116
Algorithme 15 Algorithme simplifié qui supprime les bordures difficilement visibles	116
Algorithme 16 Algorithme simplifié qui augmente l'épaisseur des bordures difficilement visibles.....	116
Algorithme 17 Algorithme simplifié qui diminue l'épaisseur des bordures trop grosses uniquement pour les objets concernés (solution 1, méthode 1)	117
Algorithme 18 Algorithme simplifié qui diminue l'épaisseur des bordures trop grosses (solution 1, méthode 2) pour l'ensemble des objets de la couche concernée	118
Algorithme 19 Algorithme simplifié qui augmente la taille des petits objets à représentation déséquilibrée (solution 2, méthode 1)	118
Algorithme 20 Algorithme simplifié qui permet de ramener la saturation d'une couleur au maximum autorisé si cette saturation dépasse ce seuil	120
Algorithme 21 Algorithme simplifié qui permet d'augmenter la luminosité des objets dont la couleur est foncée.....	121
Algorithme 22 Algorithme simplifié qui permet de retourner la liste des couleurs voisines sur le cercle chromatique d'une couleur initiale, qui ne dépassent pas une distance donnée et qui figurent parmi une liste donnée de couleurs conventionnelles	121

Algorithme 23 Algorithme simplifié qui permet de modifier les couleurs d'une liste de couches qui présentent soit un contraste faible avec les couches voisines soit une forte présence de couleurs désagréables	122
Algorithme 24 Algorithme simplifié qui augmente la taille et éventuellement fusionne les objets de petite taille.....	124

TABLEAUX

Tableau 1 Quelques échelles utilisées par l'IGN et les dimensions réelles qu'elles représentent	29
Tableau 2 Réponses des testeurs aux questions du test d'indice de bordure	154
Tableau 3 Réponses des testeurs aux questions du test d'indice de couleurs désagréables à propos de la Carte 1 en Figure 110	155
Tableau 4 Réponses des testeurs aux questions du test d'indice de couleurs désagréables à propos de la Carte 2 en Figure 111	156
Tableau 5 Planches sélectionnées pour le test de déficiences visuelles.....	180