



HAL
open science

Personnalisation des représentations cartographiques en géovisualisation : couleurs et styles

Sidonie Christophe

► To cite this version:

Sidonie Christophe. Personnalisation des représentations cartographiques en géovisualisation : couleurs et styles. Traitement des images [eess.IV]. Université Paris-Est Marne la Vallée, 2017. tel-02283421

HAL Id: tel-02283421

<https://hal.science/tel-02283421v1>

Submitted on 13 Sep 2019

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.

SYNTHÈSE DES TRAVAUX EN VUE D'OBTENIR
L'HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES
DÉLIVRÉE PAR L'UNIVERSITÉ PARIS-EST.

Spécialité : **Sciences et Technologies de l'Information Géographique**

**Personnalisation des représentations cartographiques
en géovisualisation : couleurs et styles**

Soutenue le 30 Janvier 2017

Sidonie Christophe
LaSTIG, Équipe COGIT,

Institut National de l'Information Géographique et Forestière
IGN

Présidente du jury

Anne **RUAS** Ingénieur en chef des Ponts, Eaux et Forêts, HDR IFSTTAR

Rapporteurs

Cyril **DE RUNZ** Maître de conférences, HDR IUT Reims

Christophe **HURTER** Professeur ENAC

Didier **JOSELIN** Directeur de recherche Université d'Avignon

Examinat-eur-rices

Bénédicte **BUCHER** Ingénieur en chef des Ponts, Eaux et Forêts, HDR IGN

Paule-**DAVOINE** Maître de conférences, HDR Grenoble INP

Elmar **EISEMANN** Professeur TU Delft (Pays-Bas)

Sara I. **FABRIKANT** Professeur Université de Zürich (Suisse)

Table des matières

1	Contexte et motivation	5
1.1	Enjeux autour de la qualité en cartographie	7
1.2	Enjeux pour l'IGN	9
1.3	Problématique générale et objectifs	9
1.4	Mon parcours en recherche en cartographie et en géovisualisation	11
1.5	Méthodologie générale et organisation du document	13
2	Connaissances et méthodes pour l'aide au choix des couleurs en cartographie	15
2.1	Besoins sur les palettes de couleurs en cartographie	15
2.1.1	Vers plus d'exploration des couleurs en cartographie	15
2.1.2	Contraintes existantes pour l'utilisation des couleurs	17
2.1.3	Problématique : comment extraire, caractériser, optimiser et utiliser des palettes de couleurs pour la cartographie ?	17
2.2	Extraction automatique de palettes de couleurs dans des peintures	18
2.2.1	Méthodes d'extraction automatique : clustering des couleurs	19
2.2.2	Évaluation : mesure de distance entre palettes et re-affectation des couleurs	21
2.3	Caractérisation d'une relation complexe entre couleurs : harmonie(s)	23
2.3.1	Classification des couleurs en familles chromatiques : mesures de distance pour la liaison et l'équilibre	24
2.3.2	Critères d'évaluation de l'harmonie des couleurs	25
2.3.3	Évaluation : mesure de l'harmonie des couleurs	26
2.4	Optimisations manuelles et automatiques de contraintes sur l'utilisation des couleurs	27
2.4.1	Satisfaction de contraintes traditionnelles et originales "à la manière des peintres"	28
2.4.2	Arrangements de couleurs saturées, contrastes complémentaires et grain : Pop Art	33
2.4.3	Optimisation de la visibilité des textures (gestion du recouvrement)	38
2.5	Évaluation : émotion ressentie par les utilisateurs	46
2.6	Aide au paramétrage des couleurs par du dialogue homme-machine	49
2.6.1	Méthode de conception coopérative	49
2.6.2	Modèle de dialogue homme-machine	54
2.6.3	Évaluation : utilisabilité de l'aide au choix des couleurs	58
3	Modèle(s) de style	61
3.1	Besoins sur le contrôle du style en cartographie	61
3.1.1	Vers plus d'expressivité, de photo-réalisme, d'efficacité	61
3.1.2	Spécification et contrôle du style	64
3.1.3	Problématique : comment paramétrer et contrôler les paramètres graphiques pour faire varier le style final de la carte ?	66
3.2	Spécification et rendu du style : exemple du rendu expressif	67
3.2.1	Styles visés : Cassini, aquarelle, Derain	67
3.2.2	Positionnement du projet MapStyle : extension des normes de représentation et implémentation de méthodes de rendu expressif	73
3.2.3	Conception de cartes "à la manière de"	78
3.2.4	Le cas de la représentation des zones rocheuses dans les cartes de montagne : génération de textures vectorielles	81
3.3	Intégration visuelle de données géographiques hétérogènes	84
3.3.1	Géo-visualisations abstraites et photo-réalistes du littoral	86

3.3.2	Continuum de représentations cartographiques : injecter du photo-réalisme dans l'abstraction cartographique	90
3.3.3	Géo-visualisation et stylisation 3D : mixer expressivité et photo-réalisme	96
3.4	Modéliser le style comme fonction d'appartenance d'un élément visuel à une famille de légendes/catégories/types de rendu	102
4	Conclusion et perspectives de recherche	107
	Limites du modèle de style	108
	Exploration de styles topographiques par interpolation de styles et de paramètres graphiques .	109
	Géovisualisation cognitive et modèles d'interaction pour la géovisualisation dynamique	113
	Exploitation et expérimentation du modèle de style pour différents usages	118
A	CV détaillé	121
B	Liste des publications	129
	Table des Figures	135
	Bibliographie	139

Chapitre 1

Contexte et motivation

Ce chapitre précise le contexte, la motivation et la problématique générale de mes travaux de recherche autour de la personnalisation des représentations (carto)graphiques, en particulier des couleurs et du style.

Quelques définitions préliminaires sont nécessaires.

Cartographie. La cartographie est le domaine qui s'intéresse à la conception et à l'étude de cartes. Son objectif est de représenter un territoire, à l'aide de données et sur un support réduit, et donc de simplifier des phénomènes complexes (physiques, sociaux, politiques, etc.) sur le territoire, afin de les rendre compréhensibles par un public visé.

Carte. De multiples définitions de la carte ont été données, depuis "une représentation géométrique conventionnelle, généralement plane, en positions relatives, de phénomènes concrets ou abstraits, localisables dans l'espace" (Cfc, 1990), à "une image codifiée de la réalité géographique, représentant une sélection d'objets ou de caractéristiques, relevant de l'effort créateur de son auteur par les choix opérés et destinée à être utilisée lorsque les relations spatiales ont une pertinence essentielle" (Board, 1991). Une discussion très pertinente sur la définition de la représentation plane ou assimilable à un plan, la notion "d'image mentale qui se rapporte à quelque chose, et la notion de processus par lequel celle-ci est créée", a été réalisée par Gilles Palsky¹. Nous retiendrons et insisterons sur la définition d'une abstraction de la réalité spatiale (ou d'un imaginaire spatial), issue d'une modélisation et d'une codification résultant d'un effort créatif humain : le résultat graphique provient d'une succession de choix réalisés par l'auteur des données à représenter, de la façon de les structurer, de les généraliser et de les symboliser, dans l'intention de faciliter la compréhension spatiale d'un ensemble d'objets, de relations, et de phénomènes sur le territoire.

Géo-visualisation. À partir des définitions à la fois nombreuses et variées du terme, je propose de reformuler deux définitions selon que l'on parle d'une discipline ou d'un outil :

1. La géo-visualisation est un champ interdisciplinaire de recherche qui s'intéresse aux techniques de visualisation d'un territoire ou d'un phénomène sur un territoire, avec des problématiques d'intégration visuelle de données géographiques hétérogènes (multi-sources, multi-échelles spatiales et temporelles), de représentation graphique, de rendu et d'interaction avec l'utilisateur, ainsi qu'à l'utilisabilité de ces techniques pour des usages potentiellement variés.
2. Un outil de géo-visualisation est un outil dynamique et interactif pour afficher des données géographiques, des modèles de données, des cartes, des images, et des données externes géolocalisables, permettant à un utilisateur de raisonner spatialement et/ou temporellement sur ces représentations, et d'inférer des connaissances sur le territoire ou le phénomène représenté, en offrant la capacité d'interagir avec une ou plusieurs dimensions du phénomène.

1. <http://www.hypergeo.eu/spip.php?article266>

Évolution du contexte. La profusion de données géographiques ou géolocalisables (données thématiques ou attributaires, données du Web : textes, photographies, etc.) et d'outils cartographiques permettant de combiner ces données, a permis aux utilisateurs de s'approprier de plus en plus les questions de localisation et de représentation graphique de ces données. En particulier, cette évolution a permis de donner la possibilité à chacun de se construire une carte, pour son usage personnel ou professionnel. L'implication de l'utilisateur est devenue importante dans cette production cartographique personnalisée, à partir du moment où il a eu accès à des bases de données géographiques ou cartographiques, via des interfaces grand public de visualisation de ces données. L'accès à des données géographiques hétérogènes (en échelle, en précision, en contenu, en dimension, etc.), à des bases de cartes et à des outils pour les manipuler (accéder, afficher, superposer, créer, modifier la symbolisation) a permis de donner progressivement plus de possibilités de personnalisation à l'utilisateur, à la fois sur les données et sur leurs représentations graphiques.

En termes de **symbolisation**, des outils existent et peuvent fournir différents fonds de cartes avec des symbolisations variées, ou permettent de modifier la symbolisation de certaines couches de données géographiques, à partir de palettes, de symboles ou de styles prédéfinis² La **qualité** d'une couche de données symbolisées comme d'une carte dépend de choix de symbolisation réalisés préalablement : une modification de cette symbolisation pose la question de la qualité de cette nouvelle symbolisation, en termes de lisibilité, de compréhensibilité et d'adaptation à l'usage, et les outils existants ne gèrent pas ces problèmes éventuels liés à la qualité de la symbolisation choisie, pour la couche de données concernée et quand elle est en superposition avec d'autres couches. Par ailleurs, la plupart des outils sont des boîtes noires, ne permettant pas d'accéder au paramétrage, et/ou empêchant toute re-utilisation dans une chaîne de conception existante : la capacité des outils en termes de **contrôle des processus** de conception et donc finalement, le **potentiel de personnalisation de la représentation graphique** restent limités. Les outils devraient pouvoir fournir l'**expertise** requise aux utilisateurs et s'adapter à leur démarche de conception, leur contexte d'utilisation et à leur expérience des outils, des cartes et de l'espace géographique représenté.

Enjeux et verrous. Le champ de la cartographie concerne des visualisations facilitant plutôt la communication, et les champs de la géo-visualisation et de l'analyse géo-visuelle concernent des visualisations facilitant plutôt le raisonnement spatio-temporel³. Cette définition tend à opposer dans l'usage, cartographie et géo-visualisation, même si la carte peut permettre également de raisonner spatialement. En géo-visualisation, ce qui va faciliter ce raisonnement, c'est l'interaction-même de l'utilisateur avec les données et les représentations (accès, affichage, modification voire pré-traitement, saisie, conception) et la possibilité de modifier et faire évoluer les représentations graphiques. La géo-visualisation permet donc de revisiter les problèmes de la cartographie dans un contexte d'interaction avec les données et de personnalisation des rendus ; elle adresse également des problèmes similaires à la cartographie, en particulier concernant les problèmes de conception de géo-visualisation : expression du besoin, sélection de données géographiques, pré-traitement des données (intégration, appariement, généralisation, etc.), représentation graphique, objectifs de lisibilité et d'usages visés facilités.

La **personnalisation** implique de maîtriser à la fois les connaissances et les processus en jeu dans la conception de représentations cartographiques et les outils permettant cette personnalisation : cela signifie qu'il est nécessaire d'une part de maîtriser la construction de la représentation cartographique pour qu'elle réponde effectivement aux besoins, aux préférences et à l'usage d'utilisateurs, qu'ils soient experts ou du grand public, d'autre part de pouvoir laisser le contrôle à l'utilisateur, i.e. accéder au paramétrage des méthodes et des outils, selon son niveau d'expertise ou le degré de personnalisation que l'on souhaite offrir. La personnalisation implique également d'**aider les utilisateurs à explorer ces espaces de paramètres pour concevoir des représentations graphiques variées** : toute la difficulté réside dans la nécessité de spécifier ces espaces de paramètres, de trouver des moyens de les explorer, et d'affiner une solution, à l'aide de **contraintes du domaine ou de contraintes exprimées par l'utilisateur**.

Même si des règles existent en cartographie, et que les cartographes utilisent le cadre conceptuel de la sémiologie graphique ouvert par Jacques Bertin (Bertin, 1967) et largement étendu par d'autres (Morri-

2. Modifier directement la symbolisation des données nécessite que les données soient accessibles au format vecteur, ce qui n'est pas le cas le plus fréquent. De plus, les données sont visualisables à une échelle pour laquelle la généralisation a été réalisée : cela implique que la symbolisation ne soit pas modifiable sur tous ses paramètres mais souvent uniquement sur la couleur.

3. d'après S. Fabrikant, Communication École d'été SAGEO 2011.

son, 1974; MacEachren, 1995), il reste des difficultés à résoudre concernant la symbolisation des données géographiques : comment sélectionner efficacement des signes graphiques, qui pourront être efficacement combinés, pour construire un message cartographique, que les utilisateurs visés pourront décrypter ? En particulier, les choix de couleurs et de styles nécessitent de maîtriser leurs propriétés visuelles et la façon de les sélectionner et les combiner pour construire des représentations graphiques adaptées. Il est également nécessaire d'acquérir de l'expertise sur les données hétérogènes manipulées et sur les processus de conception et de rendu sous-jacents. Pour finir, les choix de représentation graphique en fonction d'un usage visé restent complexes à spécifier. Les usages actuels des outils de conception et de représentation, comme les représentations graphiques 2D et 3D elles-mêmes, sont de plus en plus analysés et expérimentés : il n'y a pas un profil d'utilisateur qui a un comportement typique avec une carte, ou un type de représentation qui répond parfaitement à un usage donné, mais plutôt des représentations qui facilitent une tâche de cartographie dans un contexte donné, pour des utilisateurs donnés.

L'évolution du contexte comme les limites rencontrées par les outils existants permettent d'envisager des méthodes et des outils de personnalisation de la représentation graphique (en 2D ou en 3D) par un utilisateur, pour un besoin exprimé, selon ses préférences, ou pour un usage particulier.

L'enjeu et l'objectif sont de pouvoir maîtriser la conception de représentations graphiques et de permettre aux utilisateurs de concevoir et manipuler facilement données géographiques et cartes dans des outils de géo-visualisation. Les objectifs de la géo-visualisation impliquent de faire converger des connaissances et méthodes en cartographie (généralisation, symbolisation), en informatique (représentation des connaissances, informatique graphique, interaction homme-machine, visualisation), en géographie (analyse spatiale, usages de l'espace), ainsi qu'en sciences cognitives (perception, cognition, expérimentations utilisateur).

1.1 Enjeux autour de la qualité en cartographie

Les recherches passées et actuelles en cartographie, côté représentation graphique, dans la communauté nationale comme internationale, s'intéressent principalement à la représentation graphique de phénomènes spatio-temporels, donc phénomènes complexes tels que risques, évolutions, dynamiques, incertitudes, etc. La question majeure à résoudre est celle de la qualité des représentations cartographiques proposées.

La notion de qualité en cartographie est ambiguë. La qualité d'un processus cartographique (i.e. une étape de la conception cartographique), la qualité d'un outil (i.e. est-ce que cet outil me permet de construire une carte?), ou la qualité des données géographiques sont largement étudiées. La qualité de la ou des représentation(s) cartographique(s) a été rarement formalisée en tant que telle : elle se décline le plus souvent en deux concepts majeurs, la **lisibilité** et l'**efficacité**, plus largement décrits dans la littérature.

Efficacité : "*Si pour obtenir une réponse correcte et complète à une question donnée, et toutes choses égales, une construction requiert un temps d'observation plus court qu'une autre construction, on dira qu'elle est plus efficace pour cette question (...). L'efficacité est liée à la facilité que rencontre le lecteur à chacune des opérations mentales groupées dans ce que l'on appelle la lecture d'un dessin*" (Bertin, 1967, pp139-178).

La lisibilité et l'efficacité d'une carte dépendent de sa capacité à hiérarchiser l'information par une utilisation appropriée des signes graphiques, afin de guider le lecteur dans les **niveaux de lecture requis**, et lui permettre de **comprendre le message cartographique**. Les niveaux de lecture caractérisent l'importance relative que l'on veut attribuer aux phénomènes entre eux : ils représentent le degré de perception de ce que l'utilisateur lit, en fonction de l'importance des messages transmis selon la représentation graphique adoptée (Weger, 1998). Nous avons effectivement la capacité de sélectionner instantanément dans une image complexe, les informations classées par ordre d'importance, sous réserve que l'image soit correctement construite. Un lecteur ne peut pas dépasser trois ou quatre niveaux de lecture. Le cartographe va donc jouer avec ces niveaux perceptifs de lecture, qu'il va spécifier lors de la construction de la légende de la carte.

Lisibilité et perception La légende est la clé de lecture de la carte car elle permet de spécifier comme de donner à voir et à comprendre les correspondances signe-sens dans la carte. La qualité de la carte, dans notre contexte, passe par la qualité de sa légende. La qualité de la légende peut être évaluée par l'efficacité des correspondances : le lecteur comprend rapidement les correspondances signe-sens, ainsi que les relations entre les signes et donc les relations entre les sens. Elle dépend donc d'un choix judicieux des signes graphiques et des combinaisons de ces signes. Par exemple, la lisibilité de cartes de risques a également été étudiée au regard de la qualité des contrastes de couleurs dans la carte (Chesneau, 2006; Buard and Ruas, 2007, 2009). "Une légende organise les informations représentées sur la carte selon les relations sémantiques (ordre, association, différence)" (Chesneau, 2006, p.31). Le premier niveau hiérarchique concerne le **principe figure-fond** décrit en perception visuelle : une séparation doit se faire entre le fond cartographique et le reste des informations qui doit être plus saillant que le fond. Le deuxième niveau hiérarchique concerne les relations sémantiques entre les objets cartographiques représentés : les lecteurs de carte vont associer par la similarité (par le type d'implantation graphique, la forme ou la couleur) et par la continuité des objets (par les formes et les connexions spatiales qu'ils suivent ou empruntent). L'enjeu est de caractériser les **relations sémantiques** nécessaires à représenter entre les thèmes de la carte – **ordre, association, différence** – définis et structurés dans la légende, et de trouver ensuite les signes graphiques adaptés à la représentation de ces relations. La **construction du message cartographique** utilise le cadre de la sémiologie graphique et les variables visuelles définies par (Bertin, 1967), étendues à la saturation de la couleur et aux arrangements par (Morrison, 1974), le flou, la résolution et la transparence par (MacEachren, 1995), entre autres.

Compréhension et cognition Par conséquent, les variables que le cerveau analyse pour détecter des relations sémantiques particulières, sont les variables visuelles de la sémiologie graphique auxquelles s'ajoutent des caractéristiques géographiques comme les primitives géographiques, et la distribution spatiale (Skupin and Fabrikant, 2003). En particulier, l'attention visuelle se définit comme l'ensemble des mécanismes permettant d'aller sélectionner une partie de l'information visuelle présente, sur la base de la position spatiale, ou des caractéristiques visuelles des objets, afin de faciliter son traitement et son utilisation ultérieure. Dans le modèle de l'attention visuelle proposé par (Treisman and Gelade, 1980; Treisman, 1992), deux types de traitement par le cerveau sont réalisés :

- La détection est automatique lorsque la cible "saute aux yeux" (*pop-out*). La **saillance visuelle** est interprétée comme étant ce qu'il y a de plus important, de plus intéressant, à voir et à retenir, a été expérimentée en cartographie, afin de tester la validité des variables visuelles (Fabrikant et al., 2004; Fabrikant and Goldsberry, 2005; Reichenbacher and Swienty, 2007; Klippel et al., 2009), entre autres. En particulier, couleurs et contrastes de couleurs sont des paramètres intéressants pour influencer sur ce mécanisme.
- Une détection plus élaborée, telle que la **catégorisation** a été largement décrite pour caractériser des structures spatiales afin d'améliorer les processus de généralisation automatique (Regnauld, 1998), à partir des travaux sur la théorie du Gestalt (Wertheimer, 1924, 1944; Koffka, 1935; Kohler, 1947; Rock, 1983). La forme et la structure des objets géographiques jouent ainsi un rôle important.

Forme et couleur sont indissociables dans le traitement par le cerveau. La compréhension de la carte peut être améliorée par des choix de couleurs judicieux jouant aussi un rôle important dans la catégorisation et la détection de relations sémantiques. Une question se pose néanmoins quant à la perception des catégories d'objets géographiques. Fabrikant (2005) se demande si les outils cartographiques proposés sur Internet ont été construits avec l'hypothèse que tous les utilisateurs ont des "capacités de perception spatiale infaillibles" et n'ont aucun problème à comprendre le sens "caché" dans la représentation cartographique qui va leur permettre d'inférer des connaissances et de prendre des décisions. Pourtant, tout le monde n'est pas nécessairement capable de détecter des patterns géographiques ou de voir des relations spatiales entre les objets générant ainsi intuitivement du sens. De telles aptitudes ne sont évidemment pas partagées par tous. Il n'est pas certain que tous les lecteurs interprètent correctement le message, même s'il a été construit a priori correctement – les processus cognitifs des lecteurs et leur capacité d'abstraction leur étant propres – mais le cartographe cherche néanmoins à s'approcher d'un message correct pouvant être compris par les futurs lecteurs. Il est important de noter ici qu'une carte vise un public que le cartographe s'est défini lui-même et qu'il ne prétend pas que sa carte puisse être lue et comprise par tout le monde.

Utilisabilité et interaction La carte finale peut également être qualifiée par la notion d'**utilisabilité**, dans l'acceptation du terme ISO (ISO9241-11, 1998), faisant référence aux notions d'**efficacité**, d'**efficience** et de **satisfaction**⁴.

L'**efficacité**, normalement la réussite de la réalisation d'une tâche, a été décrite, comme la compréhension du message cartographique par le public visé. Le cartographe a fait un choix de représentation graphique, à l'aide d'un choix particulier de signes graphiques pour représenter des données sur un espace géographique, afin de transmettre un message particulier sur cet espace : le message est véhiculé par la carte, et le cartographe suppose que son intention sera bien comprise par le ou les lecteurs et utilisateurs de la carte.

L'**efficience** se mesure en général en termes de temps de réussite de la tâche : on considère souvent que la compréhension d'une carte doit se faire rapidement, mais que le temps de lecture est aussi corrélé à la complexité de la carte et de sa légende. Sur une interface, le nombre d'interactions avec cette interface de l'utilisateur peut également être une mesure de l'efficience.

La **satisfaction** se mesure d'une part par la satisfaction des contraintes exprimées (résultat optimal : "toutes les contraintes que j'ai données sont respectées"), d'autre part par un ressenti de l'utilisateur : "je trouve le résultat satisfaisant" (même si toutes les contraintes ne sont pas respectées). En effet, le fait de visualiser un résultat est différent de savoir si toutes les contraintes ont été respectées. La satisfaction doit être explicitée : "je suis content du résultat ...par rapport à ce que j'ai demandé / parce que je suis surprise / etc."

Une "**bonne carte**" est donc une carte adaptée à l'usage prévu, c'est-à-dire que la carte contient les informations nécessaires, représentées graphiquement de façon lisible, afin de transmettre une information permettant à un utilisateur de réaliser la tâche prévue par l'auteur (repérage, inventaire, support pour ajouter une autre information, compréhension d'un phénomène complexe, etc.). Une "bonne carte" doit être lisible, compréhensible et utilisable, selon les trois axes de définition proposés précédemment (lisibilité et perception - compréhension et cognition - utilisabilité et interaction), qui sont comme trois types de recommandation pour la conception et la personnalisation.

1.2 Enjeux pour l'IGN

Pour l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), producteur de données géographiques et cartographiques ainsi que fournisseur d'expertise en cartographie, les enjeux en géo-visualisation sont multiples, au regard des données 2D/3D/nD acquises, simulées ou produites, ainsi que des données collaboratives, géographiques ou non, créées par les utilisateurs :

- Acquérir, traiter, analyser, diffuser et mettre en valeur le référentiel géographique par la co-visualisation multi-échelles spatiales et temporelles : savoir co-visualiser des données hétérogènes, trouver des outils d'interface pour aider à la co-visualisation et à l'animation, etc.
- Fournir des services de représentation graphique sur les données 2D et 3D permettant à l'utilisateur de s'approprier les référentiels géographiques et cartographiques, ainsi que gérer des problèmes de représentation graphique (lisibilité ou occlusions dues à la co-visualisation, modifier ou adapter la symbologie ou le style de rendu, etc.).
- Favoriser l'interaction augmentée utilisateurs - données, via l'augmentation de l'interactivité avec les données et les représentations, l'adaptation à l'utilisateur, aux supports et aux usages, réalité virtuelle ou augmentée, etc.

Ces enjeux impliquent de faire de la recherche dont l'objectif est de fournir des connaissances formalisées et opérationnelles (modèles de description de processus, méthodes de résolution, méthodes de conception, modèles utilisateur et d'interaction) et des recommandations pour la mise en place de tels services de géo-visualisation modulaires, génériques et surtout interopérables. À long-terme, il s'agit d'atteindre une certaine flexibilité des systèmes et services d'information géographique au regard de la diversité des utilisateurs et de leurs usages.

1.3 Problématique générale et objectifs

Il n'existe pas une unique façon de représenter un territoire géographique ou un phénomène sur ce territoire : chacun peut être représenté de différentes façons dans différentes **cartes topographiques**,

4. "le degré selon lequel un produit peut être utilisé, par des utilisateurs identifiés, pour atteindre des buts définis avec efficacité, efficience et satisfaction, dans un contexte d'utilisation spécifié" (Nielsen, 1993; ISO9241-11, 1998)

sans nuire à sa lisibilité et à son efficacité. Parce que des **règles**, ou plutôt des **recommandations** existent, sur ce que doit être une bonne carte et sur l'usage des variables visuelles, et parce que des **outils de cartographie** existent, le problème de créer "une bonne carte" est souvent considéré comme résolu ou facile à résoudre (par les utilisateurs, les chercheurs de domaines connexes, les industriels, etc.). La conception d'une "bonne carte" implique que le concepteur maîtrise d'une part les données géographiques utilisées et leurs modélisations sous-jacentes, d'autre part la façon de les représenter à l'aide d'une subtile combinaison de signes graphiques afin d'obtenir une représentation graphique de qualité. Même s'il existe des recommandations, il n'y a pas de méthode pour faire systématiquement une bonne carte. Et pour l'instant, il reste également difficile d'évaluer ce qu'est une "bonne carte". Je reprends et étoffe ci-dessous un positionnement déjà décrit dans mon mémoire de thèse de doctorat, afin de bien préciser le problème que je cherche à résoudre à travers mes recherches, ainsi que les méthodes de résolution qui ont été envisagées. Le **problème de la conception d'une carte** est **complexe**, parce que :

- c'est un **problème requérant une grande quantité de connaissances** : il intègre des connaissances diffuses et implicites sur la manipulation des données géographiques et de leurs modélisations sous-jacentes, des signes graphiques et de leurs propriétés visuelles, requérant souvent un certain niveau d'expertise en cartographie, que ce soit en connaissances théoriques et pratiques ou en manipulation d'outils (de cartographie ou de SIG, ou dans les domaines connexes du dessin vectoriel ou du traitement d'images), et suffisamment de créativité, à partir du moment où on veut concevoir une représentation graphique qui n'existe pas déjà, ou encore utiliser des signes graphiques privilégiés (préférences, charte graphique, bibliothèque de symboles, etc.).
- c'est un **problème ouvert** : il n'y a pas une solution meilleure ou optimale, il y a peut-être plusieurs solutions, et, une ou plusieurs peuvent être satisfaisantes pour l'utilisateur. En effet, en cartographie, pour un objectif donné, il n'y a pas une seule et unique façon de manipuler des données géographiques et des signes graphiques pour représenter un phénomène. Plusieurs solutions peuvent être possibles, il dépendra au final de l'auteur ou de l'utilisateur de choisir la plus adaptée ou la plus satisfaisante au regard du résultat.
- c'est un **problème mal-structuré** :
 - **l'espace problème n'est pas défini de manière explicite et exhaustive** : il peut y avoir une solution optimale dans le cas où l'ensemble des contraintes est respecté. Cependant, ce ne sera pas nécessairement la solution la plus satisfaisante pour l'utilisateur. Parce que la difficulté principale dans notre contexte reste l'expression des contraintes par l'utilisateur, nous visons à aider l'utilisateur à les exprimer et à intégrer des contraintes formalisées. Néanmoins la satisfaction du résultat cartographique dépend de contraintes encore non identifiées et non formalisées.
 - **il n'y a pas de procédure pré-définie et complète** : malgré l'existence de règles de la sémiologie graphique venant de la perception visuelle, comme des règles de la théorie cartographique, il n'existe pas une méthode spécifique ou une recette clé en main pour réaliser une (bonne) carte.
 - **il n'y a pas de critère d'évaluation d'une solution proposée** : nous disposons de critères d'évaluation de la qualité en perception visuelle, en généralisation et même en sémiologie graphique. Cependant, nous manquons de critères d'évaluation d'une "bonne" carte puisque la qualité dépend d'un grand nombre de facteurs et contraintes non encore tous formalisées.

Le caractère plus ou moins bien défini d'un problème dépend à la fois des spécifications données en entrée et aussi des connaissances dont le concepteur dispose pour résoudre le problème. Le problème étant particulièrement difficile à décrire, il est difficile pour un utilisateur d'exprimer des contraintes et de se construire une idée mentale du résultat qu'il souhaite obtenir.

La question de la **personnalisation** implique de s'interroger sur chaque aspect de ce problème de conception, au regard du potentiel d'implication de l'utilisateur, à chaque étape du processus de conception cartographique. Ce processus peut se décomposer en une série de processus intermédiaires dont il est nécessaire de maîtriser le fonctionnement. L'objectif de rendre personnalisable ce processus global implique ainsi de pouvoir rendre un ou l'ensemble de ces différents processus intermédiaire(s), personnalisable(s) par l'utilisateur : ceci signifie d'une part de **modéliser proprement ces processus intermédiaires**, d'autre part de **les rendre contrôlables**, par un utilisateur selon ses propres capacités, goûts et besoins, ou, par un autre processus. L'utilisateur doit pouvoir être accompagné dans sa propre démarche de conception : cela requière un **niveau d'adaptation aux interactions** de l'utilisateur ainsi qu'à son **niveau de satisfaction**, ainsi que la possibilité de lui fournir un **niveau d'expertise** qui pourrait lui faire défaut, comme d'adapter l'accès au paramétrage en fonction du contexte d'utilisation.

D'une part, il est pertinent de poursuivre les travaux de recherche engagés en cartographie afin d'en questionner le devenir et l'adaptation à des interfaces, des outils, des usages et des utilisateurs évoluant rapidement ; d'autre part la question du transfert des connaissances spécifiques à la cartographie à d'autres modèles de représentations graphiques (imagerie, modèle 3D, etc.) doit se poser, en particulier dans le cadre d'outils génériques et modulaires de géo-visualisation. Pour finir, la recherche en géo-visualisation permet d'aller plus loin dans une boucle de rétroaction (supposée) avec l'utilisateur pour l'aider à comprendre voire analyser des phénomènes spatio-temporels complexes sur le territoire, et rendre les systèmes de géo-visualisation plus flexibles aux interactions de l'utilisateur.

Le système idéal ? Nous visons des modèles de description de processus qui permettent effectivement d'avoir un socle minimal, à partir duquel on peut développer un système suffisamment flexible dans ses interactions et évolutions avec d'autres processus machine ou humains et avec tout type de données géographiques, et adaptables à différents contextes applicatifs. L'objectif long-terme de mon projet est de pouvoir concevoir des systèmes d'aide à la conception de géo-visualisations modulaires et interopérables, pour différentes applications thématiques, avec différents niveaux d'interaction avec l'utilisateur. Cette flexibilité des interactions entre processus et avec l'utilisateur permettra plus aisément de passer d'une perspective 2D à une perspective 3D (au niveau des données en entrée, comme des processus spécifiques de pré-traitement des données ou de rendu), d'un utilisateur à un autre (adaptation à un niveau d'expertise minimum ou souplesse du système pour permettre une adaptation à un utilisateur dont les capacités ou les besoins sont difficilement cernables ou mal exprimés), comme d'un contexte à un autre (cartographie rapide en situation d'urgence, simulations variées en concertation citoyenne, explicitations de modèles géo-physiques au grand public, etc.).

1.4 Mon parcours en recherche en cartographie et en géovisualisation

Les recherches en cartographie à l'IGN se sont historiquement focalisées sur l'automatisation des processus de généralisation pour les besoins, en interne initialement, de l'amélioration des processus de production de cartes papier en série, au travers de la généralisation des bases de données et la généralisation cartographique. Les travaux sur la symbolisation cartographique sont plus récents et ont focalisé sur la notion de légende, de l'adaptation des couleurs dans la carte au besoin exprimé par l'utilisateur, afin également d'automatiser les processus de symbolisation et d'accompagner les utilisateurs dans des processus semi-automatiques de personnalisation, tels que la conception de cartes sur mesure.

Depuis 2006⁵, je suis membre de l'équipe COGIT, initialement "Conception Objet et Généralisation de l'Information Topographique", devenu "Cartographie et Géomatique" en 2014, du Laboratoire en Sciences et technologies de l'information géographique (LaSTIG) de l'IGN. J'ai ainsi successivement participé aux axes de recherche suivants :

- **SISSI "Aide à l'accès à l'information géographique"** animé par Bénédicte Bucher (2006-2009) visant à aider l'utilisateur à exprimer son besoin et à construire des ressources personnalisées (cartes, lots de données), en particulier extraction de données, conception de légendes et aide à la description de traitements géométriques. J'ai réalisé ma thèse de doctorat dans le cadre de cet axe de recherche, encadrée par Bénédicte Bucher et dirigée par Anne Ruas. Mes recherches se sont concentrées sur la formalisation de connaissances sur la couleur, ainsi que sur la proposition de méthodes pour aider un utilisateur à concevoir des légendes personnalisées, à partir de choix de couleurs originaux.

Encadrement : stage de fin d'études M2 IG (ENSG) *Consultation et classification d'une base d'échantillons cartographiques* (Guillaume Ménégau) en 2007 ; stage de M1 Carthagéo (univ. Paris 7), *Caractérisation de l'harmonie dans une carte* (Hugo Roussaffa) en 2009.

- **SEMIO "Sémiologie graphique"** animé par Catherine Domingues (2010-2012) poursuivant les travaux sur l'expression du besoin pour la proposition automatiques ou semi-automatiques de légendes. J'ai participé à cet axe en tant que chercheuse.

5. Avec une parenthèse d'un an de post-doc en 2010 réalisé au Laboratoire d'Informatique de Grenoble, équipe Steamer

Mes recherches se sont concentrées sur l'utilisation et l'expérimentation de la sémiologie graphique, en particulier de la couleur, et sur la notion de style.

Encadrement : 2 binômes de stage Ingénieur (IT2) Initiation à la recherche; *Conception de cartes stylisées* (Antoine Audusseau, Anahid Kasbarian) et *Protocole de test pour décorrer généralisation et symbolisation* Mathilde Dupont, Thibault Fontmarty).

- **CARTO "Cartographie : généralisation et sémiologie graphique"** animé successivement par Cécile Duchêne et Guillaume Touya (2013-2014) visant à faire converger les travaux historiques en généralisation et en sémiologie graphique de l'équipe. J'ai participé à cet axe en tant que chercheuse.

Mes recherches se sont concentrées sur l'exploitation des connaissances en sémiologie graphique, et la modélisation du style.

Encadrement : stage de M2 IG *Sémiologie graphique pour la représentation des dynamiques urbaines* (Cécile Remy) et stage de M1 Géographie *Vers une sémiologie graphique 3D appliquée à l'urbanisme* (Florian Pelloie) en 2014.

- **GEOVIS "Géovisualisation, Cartographie et Interaction"**, axe de recherche transversal entre les équipes COGIT et MATIS⁶ animé par Mathieu Brédif (IGN/MATIS). L'objectif de cet axe est de faire converger les connaissances et méthodes sur la visualisation et l'interaction avec des données géographiques hétérogènes, de la donnée brute massive issue d'acquisitions image ou Lidar à des données cartographiées et abstraites, en passant par des données dynamiques. Du côté du COGIT, cet axe intègre les travaux en cartographie (semi-)automatique (généralisation, symbolisation). En termes de transversalité, nous avons démarré des recherches sur les processus de rendu nD et la mutualisation des plateformes de visualisation 2D et 3D des équipes concernées. Cet axe se trouve à l'interface des travaux d'acquisition et d'intégration de données et des travaux nécessitant un raisonnement spatial, comme l'analyse des dynamiques de l'espace, la détection de changement, entre autres, en cours au LaSTIG.

Mes recherches se concentrent sur la modélisation, l'implémentation et l'exploitation du style comme description du rendu, en 2D et en 3D.

Dans ce contexte organisationnel de la recherche à l'IGN, je participe également aux projets partenariaux suivants :

- Depuis fin 2012, je suis coordinatrice du projet **ANR MapStyle "rendus stylisés en cartographie" (2012 - 2016)**, en collaboration avec INRIA et IRIT, réunissant des chercheurs en sciences de l'information géographique de l'IGN (COGIT, MATIS) et en informatique graphique.

Encadrement : stages courts de M2 Carthagéo (Laurane Boulanger, Blandine Decerf), 2 doctorants IGN (Charlotte Hoarau, Jérémie Ory) et 2 post-doctorants (Bertrand Duméniou, Antoine Masse).

- Depuis 2014, j'ai participé au montage et je participe au projet **ANR MapMuxing "Conception de techniques de multiplexage en cartographie" (2014 - 2018)**, porté par Guillaume Touya (IGN/COGIT), avec des chercheurs en interaction homme-machine (INRIA) et en géographie (Université Montpellier 3).

- En 2015, j'ai participé au montage, et je participe au projet **PEPS Plu++ "Visualisation de simulations de bâtiments dans le cadre de la concertation citoyenne" (2015-2016)**, porté par Mickaël Brasebin (IGN/COGIT) et Florence Jacquinod (EIVP).

Encadrement : stage de M2 UrbaSTIC *Conception et implémentation d'un modèle de style adapté à une application web 3D* (Anouk Vinesse) en 2016.

Mes travaux de recherche se sont donc déroulés principalement en collaboration avec les chercheurs de ces axes, ainsi qu'avec les chercheurs de l'axe de recherche sur les dynamiques spatio-temporelles du COGIT, en particulier Mickaël Brasebin, Elodie Buard et Julien Perret.

6. "Méthodes d'Analyses pour le Traitement d'Images et la Stéréorestitution"

J'ai encadré 2 thèses, celle de Charlotte Hoarau (direction : Sébastien Mustière, soutenue en Juillet 2015) et celle de Jérémie Ory (co-direction Bénédicte Bucher et Sara I. Fabrikant (Université de Zürich) : soutenance le 2 Décembre 2016). J'ai encadré Cécile Remy pendant 18 mois de thèse en 2014-2016, thèse qu'elle a décidé d'interrompre en Mars 2016 (direction : Sylvie Jaglin (Université Paris-Est, LATTS)).

En 2010, j'ai réalisé un post-doc de 9 mois au Laboratoire d'Informatique de Grenoble (LIG), encadrée par Paule-Annick Davoine, équipe STEAMER, sur des questions d'acquisition, de modélisation et de visualisation de données GPS sur les mobilités humaines quotidiennes (Christophe et al., 2010a,c; Buard and Christophe, 2012; Drevon et al., 2015).

Enseignement J'ai donné des cours et des travaux pratiques, principalement dans les formations de l'École Nationale des Sciences Géographiques (ENSG), mais aussi à l'Université Paul Valéry Montpellier 3, à l'Université Pierre Mendès France de Grenoble, en Master 2 et en Licence Professionnelle, depuis 2006. Les matières enseignées sont principalement *Théorie et pratique des SIG*, *Modélisation de données géographiques* et *Webmapping*. J'ai participé à l'équipe pédagogique du M2 IG (ENSG - Université Paris-Est), je participe à l'équipe pédagogique de la Licence professionnelle Géomatique et Environnement (ENSG - Université Paris 1) depuis 2014. Avec Sébastien Mustière, je co-organise le cycle de conférences scientifiques dans le cadre du M2 IGAST (ENSG - Université Paris-Est) depuis 2015.

1.5 Méthodologie générale et organisation du document

Pour aborder le problème de *la personnalisation des représentations cartographiques*, mon approche est principalement d'**identifier, de formaliser et d'implémenter des connaissances opérationnelles** et de fournir des méthodes et outils pour valider des hypothèses sur les usages potentiels des représentations graphiques de l'Information Géographique.

J'ai ainsi commencé par considérer un sous-problème, celui du **choix des couleurs en cartographie** qui est à lui seul un problème complexe. Ce problème m'a menée à expliciter un ensemble de connaissances re-utilisables et implémentables. La notion de construction et de maîtrise du message cartographique réside dans l'utilisation des couleurs, mais également dans la manipulation d'autres variables visuelles et de propriétés visuelles de plus haut niveau. Je me suis ainsi intéressée à la notion de **style**, a minima afin de décrire et contrôler une façon de rendre des primitives géométriques, in extenso pour décrire des **propriétés visuelles reconnaissables** participant à une **qualité attendue d'un rendu cartographique : le style**.

À partir de l'existant des connaissances sur l'utilisateur, ses pratiques et ses usages des représentations de l'information géographique, je me suis focalisée sur la recherche d'une meilleure façon de laisser l'utilisateur s'approprier une **démarche créative** pour lui permettre d'atteindre son but de conception. Le **contrôle utilisateur** qu'il soit sous la forme de l'aide au paramétrage en mode plus ou moins expert ou d'un dialogue homme-machine permettant de l'accompagner dans sa démarche de conception, implique l'utilisateur et permet l'adaptation du système à l'utilisateur (et non l'inverse). Il s'agit d'aider l'utilisateur à explorer la variété des possibles en cartographie et non de lui imposer des existants, et donc de pouvoir tester, rejouer et recommencer, à toute étape du processus, mais aussi éventuellement le faire avancer plus vite si nécessaire ou lui éviter l'effet page blanche, en lui proposant des solutions variées provenant de cartes existantes ou d'images n'ayant rien à voir avec la cartographie ou correspondant à une préférence de sa part. Un processus créatif doit permettre à l'utilisateur d'être guidé ou non, de viser la variété ou au contraire de retoucher finement une solution acceptable : ce processus d'exploration de solutions nécessite encore une fois un socle minimal de connaissances formalisées et de méthodes adaptées.

La figure 1.1 présente les principaux processus sous-jacents d'un socle pour *la personnalisation des représentations cartographiques en géovisualisation, via les couleurs et le style*, qui sont les différentes étapes de ma méthodologie générale : extraction de caractéristiques visuelles, affectation (optimisation de contraintes sur les caractéristiques visuelles), rendu et évaluation.

J'ai néanmoins choisi de présenter mes travaux de recherche, issues de collaboration avec d'autres chercheurs et d'encadrements d'étudiants, tout d'abord en focalisant sur le problème du choix des couleurs en cartographie, *Chapitre 1 - Connaissances et méthodes pour l'aide au choix des couleurs en cartographie*, puis, en étendant le problème à la notion de style pour la géovisualisation, *Chapitre 2 - Modèle(s) de style*.

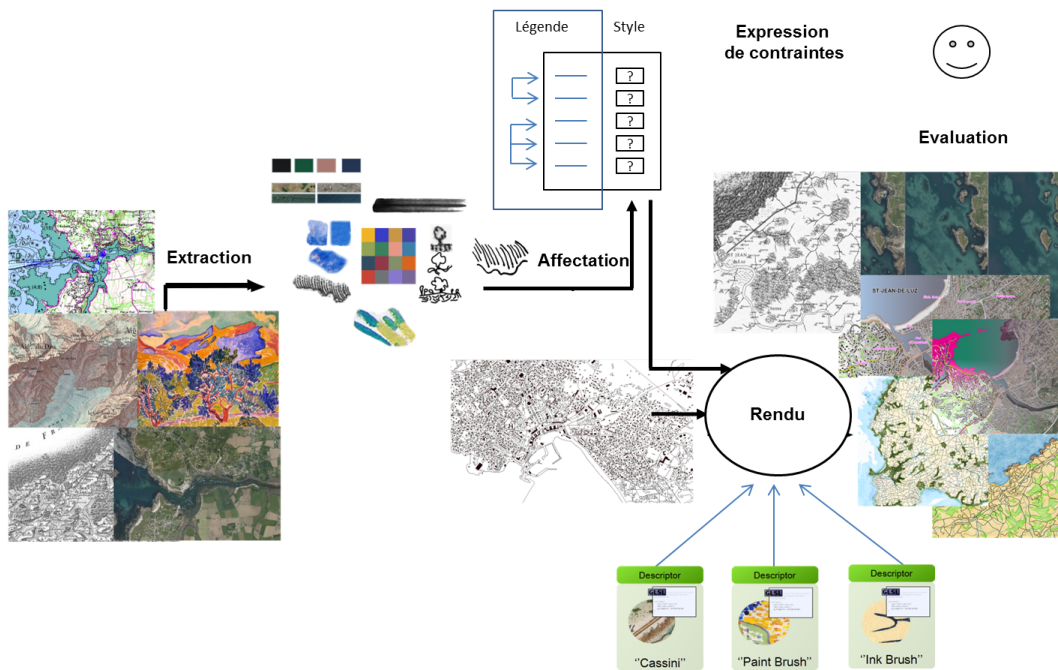


FIGURE 1.1 – Processus général

Chaque chapitre présente une reformulation du problème à partir d'une analyse des besoins identifiés en cartographie/géovisualisation, suivies d'un ensemble de résumés de travaux de recherche ayant visé à résoudre le problème identifié. Les différentes collaborations scientifiques, avec les étudiants encadrés en thèse et en stage, ainsi qu'avec des chercheurs d'ici ou d'ailleurs seront précisées.

Un CV détaillé est fourni en Annexe A. Une liste des publications est fournie en Annexe B.

Présentation Les travaux présentés sont systématiquement introduits par quelques phrases en italique, contextualisant le travail réalisé (avec qui, quand, comment) et précisant le ou les papiers auxquels se référer pour en savoir plus. J'ai choisi de résumer en 4-5 pages systématiquement les travaux réalisés afin de clarifier la problématique, la méthodologie et les résultats. Je préciserai si les travaux n'ont pas été publiés.

Mode d'emploi Une personne souhaitant avoir une vision générale de ces travaux peut lire uniquement les introductions et conclusions de chaque sous-partie, et ne pas lire le détail de chaque travail de recherche. Une personne souhaitant en savoir plus sur un travail de recherche peut lire le(s) papier(s) de référence indiqué(s) et la liste des travaux cités.

Le concepteur passe finalement plus de temps à définir un problème complexe qu'à le résoudre (Bonnardel 2006).

Chapitre 2

Connaissances et méthodes pour l'aide au choix des couleurs en cartographie

Le choix des couleurs est un processus complexe dans le processus de conception cartographique, basé sur des connaissances de domaines variés et surtout implicites : conventions, habitudes, symbolique, goûts, expérience en cartographie, etc. Même si des conventions, recommandations ou règles existent pour manipuler la couleur et ses composantes, en général et en cartographie, c'est encore un défi de savoir quelle(s) couleur(s) utiliser et comment les combiner pour représenter des données géographiques, des relations particulières entre des objets, pour faire passer un message particulier, tout en assurant la lisibilité et la compréhensibilité de la carte en cours de conception.

Ce chapitre vise à préciser les besoins sur la manipulation de palettes de couleurs en cartographie (2.1) et à présenter des travaux associés fournissant un ensemble de connaissances formalisées et des méthodes, d'extraction automatique de palettes (2.2), de caractérisation d'une relation complexe de contraste de couleurs qu'est l'harmonie (2.3), d'optimisations manuelles et automatiques pour l'affectation de palettes (2.4). Ensuite, nous présentons une expérimentation sur le ressenti émotionnelle des utilisateurs devant des cartes topographiques originales (2.5). Pour finir, l'aide au paramétrage des couleurs par du dialogue homme-machine, issue de mes travaux de thèse, sera présentée (2.6).

2.1 Besoins sur les palettes de couleurs en cartographie

La qualité de la carte dépend entre autres des choix de couleurs réalisés : en effet, la structure de l'information est portée par ces choix de couleurs et peut être lue, comprise et interprétée correctement uniquement si les couleurs choisies véhiculent effectivement cette structure. Les niveaux hiérarchiques dans la carte peuvent être mis en avant par un choix adapté de couleurs. Le processus du choix des couleurs pendant la conception d'une carte intervient lorsque la légende a été préalablement structurée en lignes de légende et que le style de chaque ligne de légende a été décrit pour les paramètres concernant le type de symbole utilisé, la présence/absence d'un contour, etc. : il ne manque que la couleur à spécifier pour chaque ligne de légende. Cela revient pour le concepteur de la carte à trouver **une palette de couleurs** : il s'agit de la sélection d'un ensemble de n couleurs qui vont être appliquées aux thèmes de la légende.

2.1.1 Vers plus d'exploration des couleurs en cartographie

Afin de résoudre des problèmes classiques mais toujours complexes de représentation cartographique – un très grand nombre de classes à représenter (ex. : classes d'occupation du sol), une adaptation des couleurs à des déficiences visuelles, ou affiner un choix de couleurs – il est important de pouvoir explorer largement un ensemble de couleurs possibles, tout en gérant un ensemble de contraintes provenant de la théorie de la cartographie et de la sémiologie graphique, et des contraintes exprimées par l'utilisateur (nombre de couleurs, couleurs visibles pour une personne atteinte d'une déficience visuelle, préférences, etc.). Les problèmes sous-jacents sont les suivants : il s'agit tout d'abord de choisir des couleurs adaptées à un problème, en vue de les affecter aux lignes de la légende, et qui se combinent 'bien' entre elles dans la carte finale, au regard de l'objectif poursuivi, des données utilisées et de l'espace géographique représenté.

Des outils pour sélectionner des couleurs existent dans les outils cartographiques, SIG, de dessin vectoriel ou de traitement d'images et des bases de données de palettes prédéfinies existent dans les outils de dessin vectoriel. Des outils plus interactifs permettent d'accéder à des bases de données prédéfinies de palettes ou de générer des palettes, en fonction du paramétrage de l'utilisateur, en offrant différents niveaux de contrôle sur les relations entre les couleurs. En particulier, Cynthia Brewer, à partir de la théorie sur les couleurs et d'une revue fondamentale sur les contrastes de couleurs (Brewer, 1992), a défini de façon expérimentale, une base de données de palettes de couleurs (*color schemes*), en fonction du nombre de classes à représenter et du type de relations représenté par la palette, i.e. séquentiel, qualitatif et divergent, donnant lieu à des recommandations sur l'usage et la perception de palettes de couleurs pour la cartographie thématique (Brewer, 1994a,b, 2005) : ces travaux ont permis de créer ensuite le ColorBrewer, en version papier ou en ligne, permettant à un utilisateur de trouver un ensemble de palettes adapté à son problème de représentation thématique, en fonction également de la qualité de la palette, en cas de déficiences visuelles ou pour sa visualisation sur écran ou pour impression (Brewer, 2003; Brewer et al., 2003; Harrower and Brewer, 2003). La version en ligne permet d'appliquer la palette sélectionnée à un jeu de données par défaut. Cette base de connaissance et l'outil *ColorBrewer* associé¹ sont largement utilisés en cartographie mais également dans d'autres domaines comme la visualisation d'information. Dans notre contexte de cartographie topographique, il nous manque cependant la relation entre la palette et les données sur lesquelles elle va s'appliquer : en effet, la qualité d'une palette dépend largement des arrangements spatiaux des objets cartographiques à représenter.

D'autres outils existent comme *ColourLovers*² pour la sélection de gammes colorées, et, *Color gradients explorer* pour générer des gradients de couleurs avec une couleur d'inflexion³. D'autres outils interactifs permettent de naviguer dans les espaces de couleurs, à partir de *templates* d'harmonie (couleurs adjacentes, triade, tétrade, etc.), et de comparer et d'affiner les couleurs de la palette entre elles : *Adobe Kuler*⁴ et *Paletton*⁵. Ces outils plus sophistiqués permettent aux utilisateurs de manipuler les couleurs de façon intuitive sur la base de règles fournies par les outils.

Les limites de ces outils pour la cartographie sont liées au fait de ne pas pouvoir exprimer de contraintes spécifiques au domaine de la cartographie, et/ou des contraintes utilisateur sur des préférences de couleur, de ne pas pouvoir tester les palettes sélectionnées ou générées sur le jeu de données de l'utilisateur, et de ne pas avoir de méthodes d'évaluation de la palette sélectionnée pour un objectif cartographique. Même si certains outils intègrent des règles entre les couleurs de la palette fournie (templates d'harmonie, dégradés de couleurs, et palettes de brewer), les outils existants ne permettent pas de définir de nouvelles règles. De plus, nous n'avons pas accès aux règles et aux algorithmes sous-jacents, ce qui ne nous permet pas de les re-utiliser dans un processus ou de les faire paramétrer par l'utilisateur lui-même. Il serait ainsi pertinent de pouvoir spécifier des règles d'utilisation des couleurs en cartographie (afin de mettre en avant des relations particulières dans la légende), de spécifier des contraintes de l'utilisateur ("j'ai besoin d'une dizaine de couleurs bien différentes", "j'ai besoin d'un dégradé de couleurs", "je préfère cette couleur, mais je n'ai pas d'avis sur les autres couleurs", etc.), et d'accéder à des indicateurs de la qualité de la carte en cours de construction ou de l'adéquation de la palette choisie avec le jeu de données de l'utilisateur.

Les difficultés pour l'utilisateur, et donc les verrous en recherche, sont donc les suivantes :

- accéder à et explorer un espace de couleurs,
- accéder à l'expertise cartographique : pouvoir sélectionner des contraintes cartographiques,
- exprimer des contraintes,
- explorer, tester des solutions cartographiques variées,
- sélectionner une solution finale satisfaisante.

Ces verrous nécessitent d'aller chercher des connaissances sur les couleurs et les relations entre couleurs dans des domaines connexes variés (colorimétrie, vision, perception visuelle, sciences neurologiques, vision par ordinateur, etc.), et en particulier de s'intéresser aux aspects perceptifs et cognitifs de la couleur (Sutter, 1858; Pastoureau, 1992; Mollard-Desfour, 1998; Roque, 2009), entre autres⁶.

1. <http://colorbrewer2.org>

2. <http://www.colourlovers.com/palettes>

3. http://www.geotests.net/couleurs/gradients_inflex_en.html

4. <https://color.adobe.com/fr/create/color-wheel/>

5. <http://paletton.com/>

6. Des états de l'art sur ces questions sont disponibles dans mes travaux de thèse (Christophe, 2009a, 2011) et dans le travail sur l'extraction de palettes de couleurs pour la cartographie (Christophe et al., 2013)

2.1.2 Contraintes existantes pour l'utilisation des couleurs

Les premières contraintes existantes pour l'utilisation des couleurs sont liées d'une part, à la **représentation des relations sémantiques** – ordre, association, différence – dans la carte, d'autre part à la notion de **couleurs conventionnelles** pour la cartographie.

Dans sa thèse, Elisabeth Chesneau a mis en œuvre une première approche de la connaissance pratique dans le domaine artistique, afin de manipuler les distances entre couleurs via un ensemble de cercles chromatiques compatibles avec les contrastes d'Itten classés en fonction des relations sémantiques (Chesneau, 2006, 2007) :

1. les **contrastes de teinte, des complémentaires et de chaud-froid** sont étudiés à travers le paramètre θ des couleurs : plus la distance entre deux teintes sera grande, plus elles exprimeront une **relation de différence**. Au contraire, plus la distance entre deux teintes sera faible, plus elles exprimeront une **relation d'association** ;
2. les **contrastes clair-obscur et de saturation** permettent d'exprimer une **relation d'ordre** entre couleurs :
 - (a) le **contraste clair-obscur** permet d'exprimer une relation d'ordre entre des informations ordonnées de *petit à grand* : plus la distance entre deux clartés est forte, plus le contraste exprime une relation d'ordre importante (petit, grand),
 - (b) le **contraste de saturation** permet d'exprimer une relation d'ordre entre des informations non ordonnées afin de créer des hiérarchies de lecture entre les thèmes plus ou moins importants : plus la distance entre deux niveaux de saturation est forte, plus le thème, représenté par la couleur ayant le niveau de saturation le plus élevé, est important par rapport à l'autre thème,
3. le **contraste de quantité** : l'objectif est de comparer les rapports entre des couleurs en relation de différence ou d'association et de déterminer si ces quantités créent une harmonie ou un équilibre visuel ;
4. le **contraste simultané** n'a pas été étudié car il peut induire des confusions dans l'interprétation cartographique.

Des distances entre chaque couple de couleurs des cercles ont été mesurées par (Chesneau, 2006) puis par (Buard and Ruas, 2007). Ces distances sont des notes de contraste qui ont été attribuées lors de tests au cours desquels les utilisateurs ont évalué la proximité ou la distance entre deux teintes et entre deux niveaux de valeur : ce sont donc des *distances perçues*. À partir de toutes les notes, une note moyenne finale a été attribuée à chaque couple de couleurs, selon le contraste entre teintes et selon le contraste entre valeurs. Des seuils sont donnés permettant d'évaluer pour chaque couple de couleurs la qualité de leurs contrastes de teinte et de valeur. Ces travaux ont fourni une base pratique pour l'évaluation et l'amélioration des contrastes de teinte et de valeur, à partir d'un système de référence des couleurs (cercles chromatiques) et des matrices de notes des contrastes.

2.1.3 Problématique : comment extraire, caractériser, optimiser et utiliser des palettes de couleurs pour la cartographie ?

Notre problématique peut se décomposer alors selon les trois étapes suivantes, chacune pouvant être manuelle, semi-automatique ou automatique :

1. Extraction d'une palette de couleurs : il s'agit de la sélection d'un ensemble de n couleurs appelé *palette*, depuis un outil externe (*color picker*, *color chooser*, outils de manipulation de palettes, etc.) ou depuis une source (image, peinture, carte, etc.). Cette palette peut intégrer des règles d'utilisation sur ses couleurs provenant, soit de l'image source dont elle est issue (*'cette couleur est majoritaire en termes de pixels'*, *'ces deux couleurs sont toujours juxtaposées'*, etc.), soit de préférences émises par l'utilisateur (*'je voudrais cette couleur en priorité'*, *'je voudrais conserver le contraste entre ces deux couleurs'*, *'je veux voir principalement cette couleur'*, *'il me faut au moins un bleu pour la mer'*, etc.), ou d'un contexte particulier (couleurs adaptées à des déficiences visuelles, couleurs adaptées à la vision écran nocturne, etc.) sur l'utilisation de ces couleurs : ces règles d'utilisation se traduisent par des contraintes qui sont portées par les couleurs elles-mêmes et/ou par la palette.

Problème : Comment choisir des couleurs et créer une palette de couleurs à utiliser ? Si il n'y a pas de palette, la question est de savoir depuis quelle source en obtenir une et comment.

- Affectation des couleurs de la palette aux lignes de la légende et rendu : l'affectation d'une couleur à une ligne de légende (une étape de la description du style de l'objet) se fait en respectant un ensemble de contraintes portées par les couleurs de la palette (étape précédente), par la légende (relations sémantiques), par les arrangements spatiaux des objets dans la carte (les routes traversent des forêts, les routes sont sous la forme d'un maillage dense, etc.).

Problème : Comment identifier, définir des règles d'utilisation des couleurs ? L'explicitation de règles d'utilisation de la couleur en cartographie, comme en art, permet de définir des contraintes sur la façon dont les couleurs peuvent, et doivent être perçues dans la carte pour porter ces relations hiérarchiques (contrastes, harmonie).

- Évaluation et amélioration de la palette : une fois la carte créée, la question est d'évaluer le résultat et de pouvoir l'améliorer en retouchant la palette de couleurs ou l'affectation des couleurs.

Problème : Comment améliorer les arrangements des couleurs, ou en interaction avec d'autres variables visuelles, pour composer des cartes véhiculant un message particulier ?

Dans l'objectif de générer une large variété d'arrangements de couleurs possibles dans la carte, j'ai cherché à considérer des règles variées d'utilisation de la couleur. En effet, la question se pose d'utiliser des couleurs différentes des couleurs traditionnelles, mais également des arrangements de couleurs différents des arrangements traditionnels⁷. La notion de 'traditionnel' est évidemment lié à un contexte géographique, historique et culturel, auquel les utilisateurs de cartes sont habitués. D'une part les règles d'utilisation traditionnelle des couleurs dans les cartes topographiques ne sont pas explicitées, d'autre part nous sommes tous susceptibles d'avoir besoin de règles d'utilisation différentes selon les problèmes rencontrés. J'ai donc cherché à questionner comment la connaissance de règles dites traditionnelles et de règles dites artistiques peuvent permettre de répondre au verrou de la diversité des résultats cartographiques possibles. En particulier, il s'agit de spécifier :

- des règles "traditionnelles" d'utilisation de la couleur en cartographie topographique afin de construire un ensemble de contraintes dites cartographiques. Selon les pays, les règles "traditionnelles" d'utilisation de la couleur peuvent être perçues comme très originales, d'un pays à un autre.
- des règles "originales" d'utilisation de la couleur provenant du domaine artistique et en particulier de peintures afin de construire un ensemble de contraintes dites artistiques.

Conclusion Dans les parties suivante de ce Chapitre, nous résumons des travaux répondant à chacune des étapes précédemment identifiées, dans l'ordre du processus : extraction de palettes de couleurs (2.2) - caractérisation de relations entre couleurs (2.3) - optimisations manuelles ou automatiques d'affectation des couleurs (2.4) - évaluation des palettes de couleurs (2.5) et interaction avec l'utilisateur (2.6).

2.2 Extraction automatique de palettes de couleurs dans des peintures

Cette section résume le papier S. Christophe, J. Perret, C. Hoarau, 2013, Extraction de palettes de couleurs pour l'aide à la conception cartographique, Technique et Science Informatiques, Revue des sciences et technologies de l'information, 3-4/2013, 401-430 (Christophe et al., 2013).

Dans ce travail, nous nous sommes confrontés au problème de l'extraction automatique d'une palette de couleurs pour la cartographie depuis une peinture. Les outils en ligne ne fournissent pas les critères utilisés pour sélectionner les couleurs automatiquement et ne sont pas paramétrables, rendant leur réutilisation difficile dans le cadre de l'automatisation du processus de conception cartographique. D'autre part, ces outils ne donnent pas des résultats satisfaisants pour nos besoins : les couleurs fournies sont souvent en trop petit nombre (de 4 à 6) pour la cartographie et correspondent aux couleurs majoritaires en nombre de pixels dans l'image, couleurs qui ne sont pas forcément celles qui participent le plus à l'impression visuelle générée par la peinture (couleurs et contrastes de couleurs saillants).

Des travaux de recherche en informatique graphique ont testé des approches par segmentation d'images, mettant en évidence des problèmes de redondance dans les palettes résultantes (des régions de couleurs similaires éloignées dans l'image, ou des couleurs sombres ou désaturées donnent des résultats redondants) ou des problèmes de trop grande variabilité dans les catégories de couleurs résultats (dans une

⁷. J'entends 'traditionnel' comme 'habituel, usuel', c'est-à-dire les palettes de couleurs classiquement utilisées par les fournisseurs de cartes et fonds de plans, quels qu'ils soient.

catégorie, un individu est capable de nommer plusieurs couleurs différentes alors qu'on ne devrait pouvoir en nommer qu'une) (Barla, 2006). Notre objectif est de pouvoir fournir des palettes à des utilisateurs dans le contexte de l'aide à la conception cartographique : nous visons donc de fournir une palette, issue d'une peinture, constituée d'une dizaine de couleurs, différentes les unes des autres, et représentatives de la peinture source. Des couleurs même sur de toutes petites surfaces mais très brillantes (le jaune de Klimt) ou deux couleurs dans un contraste spécifique (le bleu-orange du ciel et le rouge-bleu de la robe dans le Titien) peuvent être saillantes et jouer un rôle visuel important dans la peinture finale. Leur quantité en nombre de pixels peut être faible alors que l'information visuelle est importante. L'objectif dans ce papier est donc de classer et réduire le nombre de couleurs dans la peinture analysée afin d'en extraire un sous-ensemble représentatif.

La qualité des palettes extraites est donc, pour nous, à évaluer vis-à-vis de leur utilisation pour la conception de cartes, et non vis-à-vis de l'erreur entre l'image initiale et l'image utilisant la palette extraite. Nous ne cherchons pas à reconstruire une nouvelle image avec ces couleurs (*re-mapping*), mais bien à réutiliser ces couleurs sur un jeu de données géographiques : nous ne partageons donc pas l'objectif des méthodes existantes dans le domaine de la compression d'image afin de réduire le nombre de couleurs d'une image (et donc sa taille en mémoire) tout en conservant sa qualité visuelle, appelées méthodes de quantification de couleurs (*color quantization*).

2.2.1 Méthodes d'extraction automatique : clustering des couleurs

Afin de résoudre ce problème, nous avons choisi de tester trois méthodes de classification non supervisée (*clustering*) : les K-means, octree, classification hiérarchique ascendante (CAH). L'approche proposée est illustrée par la figure 2.1. Tout d'abord, les couleurs de l'image en RVB sont converties dans l'espace de couleurs CS (RVB, CIE Lab, CIE XYZ), considéré comme un espace de travail dans lequel les couleurs sont décrites par des coordonnées et qui est muni d'une métrique (distance entre couleurs D : euclidienne, Manhattan, etc.). Elles sont ensuite utilisées par un algorithme de clustering (K-means, octree ou CAH) puis converties en RVB à nouveau. Tous les algorithmes proposés prennent par ailleurs en entrée une distance entre couleurs D et le nombre de couleurs de la palette finale K .

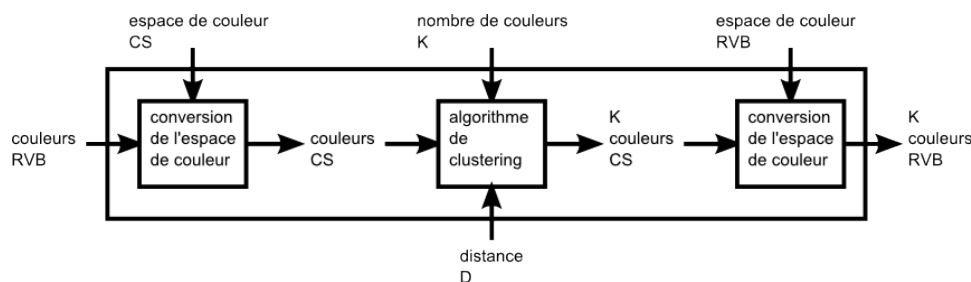


FIGURE 2.1 – Schéma de l'approche de clustering des couleurs d'une peinture en K couleurs d'une palette (Christophe et al., 2013)

Nous avons testé les trois méthodes suivantes :

- **K-Means** (MacQueen, 1967) : la méthode des K-means est un outil de classification classique qui permet de découper l'espace des couleurs d'une image (les données) en K sous-espaces de couleurs (les classes) représentés par une couleur moyenne (le centroïde de la classe). A partir des K classes et des centroïdes initiaux, l'algorithme identifie l'ensemble des couleurs de la classe et re-évalue ensuite la position des centroïdes. Deux paramètres sont importants : l'espace de travail et la distance utilisée pour choisir le centroïde le plus proche de chaque couleur (et donc la classe qui lui est associée). Pour obtenir une solution stable, nous avons lancé l'algorithme plusieurs fois, afin de ne conserver que la meilleure solution, i.e. la solution qui minimise la somme des carrés des distances entre chaque couleur d'un cluster et de son centroïde.
- **Octree** (Gervautz and Purgathofer, 1988) : la méthode de l'octree est une méthode de partitionnement de l'espace des couleurs hiérarchique où chaque nœud de l'arbre peut avoir jusqu'à 8 descendants. L'algorithme consiste à insérer des couleurs à l'arbre en s'appuyant sur la représentation binaire de la couleur pour déterminer sa position dans l'arbre. Chaque couleur est insérée au niveau le plus bas et à chaque insertion, l'arbre est réduit (ou élagué) à chaque fois que le nombre de feuilles de l'arbre dépasse le nombre de couleurs recherché. La procédure de réduction consiste à choisir le nœud de plus haut niveau qui vérifie certaines conditions, à en supprimer les

feuilles et à marquer ce nœud comme une feuille. On garantit de ne jamais avoir dans l'arbre plus de feuilles que nécessaire. L'octree obtenu sur le tableau de Derain est représenté dans la figure 2.2, le nombre de couleurs a été réduit de 99227 à 64.



FIGURE 2.2 – Octree à 64 couleurs en CIELab sur le tableau de Derain (Christophe et al., 2013)

- **Classification hiérarchique ascendante** (Ward, 1963) : La méthode présentée ici est une approche ascendante consistant à regrouper progressivement des clusters ne contenant au départ qu'une seule couleur, jusqu'à l'obtention d'une hiérarchie complète de clusters. Les clusters créés portent l'indice d'agrégation calculé par le critère de liaison. Une fois cette hiérarchie créée, le nombre de couleurs peut être réduit en élaguant l'arbre, par exemple en choisissant l'indice d'agrégation permettant d'obtenir le nombre de couleurs souhaité ou le nombre le plus proche possible. En effet, plusieurs clusters pouvant avoir le même indice d'agrégation, il est parfois impossible d'obtenir le nombre de clusters K sans faire de choix arbitraire. Pour simplifier les calculs, nous utilisons tout d'abord un octree réduisant le nombre de couleurs à 64 puis nous utilisons la classification hiérarchique ascendante afin de trouver les K couleurs recherchées (Cf. Figure 2.3).

Trois facteurs influencent le résultat : l'espace de représentation des couleurs noté CS pour Color Space (RVB, CIELab, CIE XYZ), la métrique notée D (euclidienne, Manhattan, etc.) et le critère de liaison noté L (mesure de la distance ou de la dissimilarité entre clusters, définie ici par le critère de Ward⁸ (Ward, 1963)) (Cf. figure 2.3).

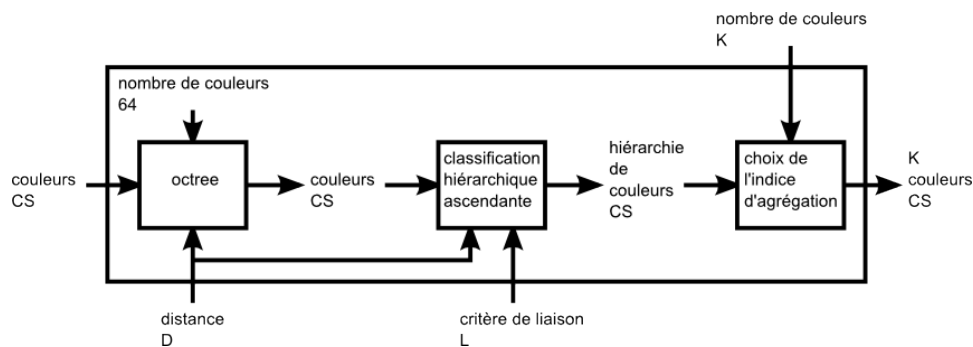


FIGURE 2.3 – Schéma du fonctionnement de notre méthode de classification hiérarchique ascendante et Octree à 64 couleurs en entrée (Christophe et al., 2013)

La figure 2.4 montre les résultats de la méthode hiérarchique respectivement en 16 et 64 couleurs : visualisation des clusters et des couleurs de la palette, issus du tableau de Derain. La palette à 16 couleurs peut être proposée telle quelle à l'utilisateur lui permettant d'exprimer ses préférences directement sur les couleurs : néanmoins, certaines couleurs peuvent quand même paraître très proches visuellement (les deux bleus de la première ligne). La palette à 64 couleurs est intéressante car elle contient des dégradés de la valeur des couleurs caractéristiques permettant d'avoir des couleurs supplémentaires si les 16 couleurs proposées précédemment sont insuffisantes pour produire des cartes satisfaisant l'utilisateur (nombre de thèmes, contrastes à mettre en œuvre suivant des relations sémantiques dans la carte). Nous obtenons donc des palettes de couleurs proches des couleurs caractéristiques recherchées.

Une des améliorations notables des méthodes de quantification des couleurs, due au choix de l'espace de couleurs, est la qualité des distances entre couleurs. En évoluant dans un espace de couleurs uniforme

8. minimum de variance inter-cluster

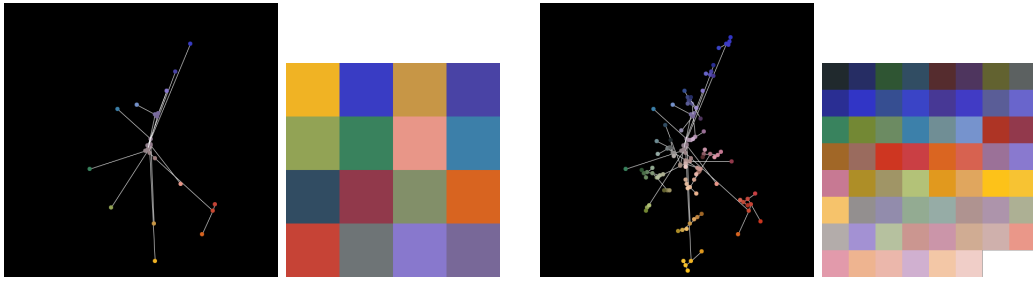


FIGURE 2.4 – Visualisation des 16 et 64 clusters et couleurs de la palette Derain (Christophe et al., 2013)

comme CIELab, on manipule des distances entre couleurs qui sont significatives pour la perception humaine. Cela permet de mieux regrouper des couleurs similaires lors des répartitions des méthodes précédentes :

- en cluster dans la méthode des K-Means,
- en nœud dans la méthode des octrees,
- en classe dans la méthode de classification ascendante hiérarchique.

Ainsi, le système CIELab représentant en premier lieu la luminosité par la coordonnée L, les couleurs se trouvent organisées d’abord par luminosité puis par chromaticité, ce qui favorise la conservation dans l’octree de couleurs claires et lumineuses. En effet, les couleurs claires et lumineuses sont plus sensibles lors des étapes de moyennage de couleurs que les couleurs sombres : l’utilisation particulière des coordonnées CIELab a pour but de les préserver en les séparant a priori des couleurs sombres dans l’espace des couleurs. Nous voulions pouvoir conserver ces couleurs claires et lumineuses parfois particulièrement saillantes dans la peinture source.

2.2.2 Évaluation : mesure de distance entre palettes et re-affectation des couleurs

Nous avons proposé deux approches pour évaluer les palettes générées par nos différentes méthodes de clustering dans différents espaces de couleurs : la comparaison automatique de palettes par mesure de distance entre une palette générée et la palette de référence et la re-affectation des couleurs de la palette à la fois dans la peinture source et dans une carte topographique.

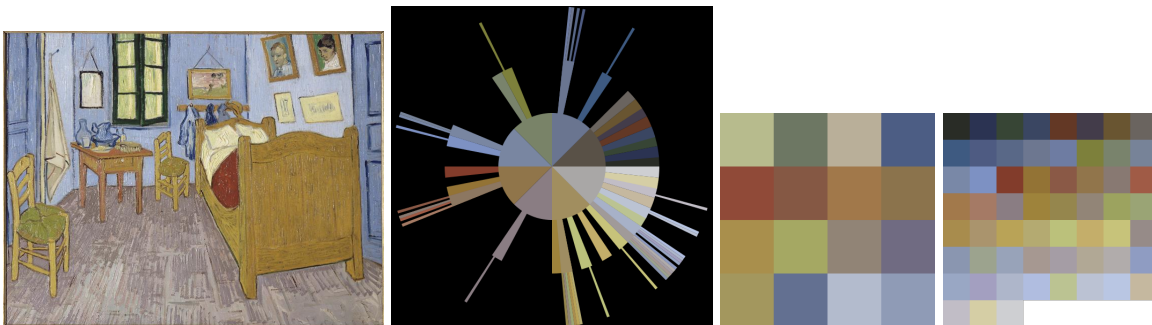


FIGURE 2.5 – Octree en 64 couleurs sur le tableau de van Gogh et visualisation des palettes à 16 et 64 couleurs(Christophe et al., 2013)

Mesure de distance entre une palette générée et la palette de référence Afin de comparer les palettes générées par les différentes méthodes de quantification d’image, nous avons mis au point une mesure de distance entre deux palettes en s’inspirant des distances d’édition de chaîne de caractères : il s’agit d’évaluer la distance des palettes générées automatiquement avec la palette de référence construite à la main pendant ma thèse. La méthode consiste à aligner les couleurs de la palette à évaluer avec celles de la palette de référence. Pour cela, pour chaque couleur de la palette à étudier, nous déterminons la couleur la plus proche dans la palette de référence dans l’espace de couleurs CIELab. Ces deux couleurs seront associées si elles sont assez proches (coût de transformation = distance euclidienne entre les deux

couleurs). Si plusieurs couleurs générées sont associées à une même couleur de la palette de référence, nous considérons qu'il est nécessaire de fusionner ces couleurs (coût de fusion = distance minimale entre les couleurs associées et la couleur de référence). Si une couleur de la palette de référence n'a pas été associée à une couleur de la palette à évaluer, nous définissons un coût d'ajout égal à la distance euclidienne entre la couleur de référence à ajouter et la couleur la plus proche dans la palette à évaluer : afin de privilégier certaines couleurs représentatives de la palette de référence, ce coût a été pondéré. Les coûts de transformation, fusion et ajout sont ensuite ajoutés pour construire une mesure de distance entre la palette à évaluer et la palette de référence. Un poids plus important est donné au coût d'ajout, l'absence d'une couleur de la palette de référence dans la palette à évaluer étant considérée comme critique.

Nous avons donc généré un ensemble de palettes pour un tableau de van Gogh avec les trois différentes méthodes, dans les différents espaces de couleurs, pour un même nombre de couleurs initial : l'ensemble des palettes est présenté en figure 2.6, ordonné par la distance entre palettes, de la faible (meilleure palette) à la plus grande (plus mauvaise palette).

Les palettes générées montrent les résultats suivants :

- Les couleurs majoritaires du tableau se retrouvent généralement dans les palettes résultantes.
- Certaines palettes présentent des couleurs inexistantes dans les peintures sources. Deux raisons sont possibles. La première est que les méthodes de clustering comportent toutes des étapes de moyennage des couleurs, faisant donc apparaître de "nouvelles" couleurs. La deuxième est l'influence de l'espace de couleurs utilisé : nous pouvons remarquer la présence de trois verts particulièrement vifs introuvables dans le tableau de van Gogh, provenant de l'espace de couleurs YCbCr dont la répartition des couleurs offre une grande part aux verts.
- Certaines de nos couleurs significatives (le rouge de l'édredon ou le vert foncé de la fenêtre dans la peinture de van Gogh) apparaissent moins souvent : nous considérons que les méthodes qui les conservent sont les meilleures.
- Les palettes issues de la méthode des K-Means (la première et la deuxième) sont un peu plus ternes que celles issues de la CAH (la quatrième et la cinquième) : c'est une conséquence de l'utilisation du centroïde intrinsèque à la méthode des K-Means. Cela n'est cependant pas rédhibitoire, les palettes issues du K-Means restent chromatiquement plus proches de celle de l'expert.

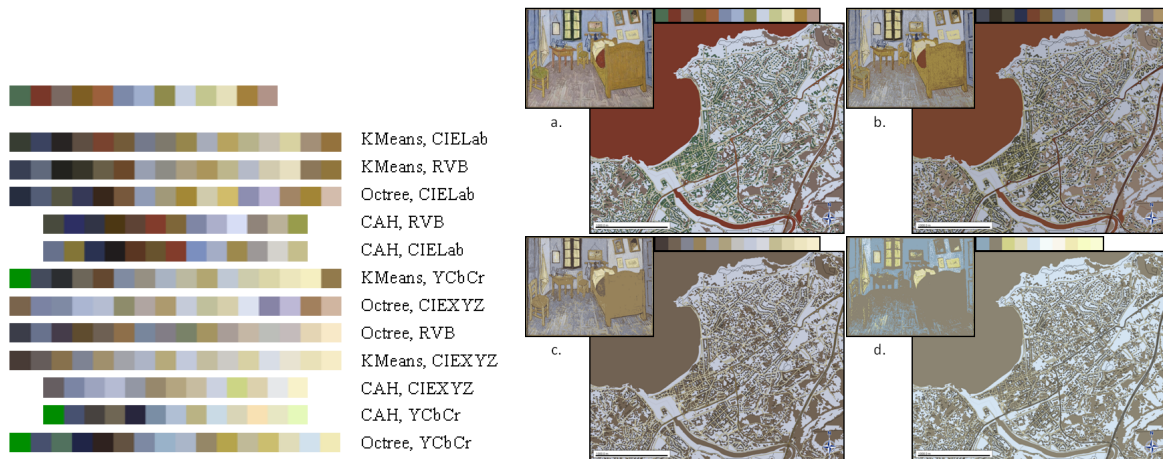


FIGURE 2.6 – Evaluation des palettes issues du tableau de van Gogh (Christophe et al., 2013)

Re-affectation des couleurs de la palette dans la peinture et dans une carte (*remapping*)

Afin d'évaluer nos distances entre palettes, nous les réaffectons une à une dans l'image initiale de la peinture et dans une carte topographique. La figure 2.6 présente la peinture initiale et la carte topographique symbolisée avec la palette de référence (a), puis la réaffectation des palettes ayant obtenu respectivement la plus petite distance (b), la distance moyenne (c) et la plus grande distance (d) à la palette de référence extraite de la peinture de van Gogh, dans l'ensemble des palettes (entre 10 et 19 couleurs par palette). La meilleure réaffectation dans le tableau reproduit bien l'impression initiale de la peinture. Les deux autres palettes sont de plus en plus ternes et s'éloignent de la peinture initiale. En revanche, les contrastes clair-obscur sont bien conservés, même dans la plus mauvaise palette, ce qui se retrouve également dans

les réaffectations similaires sur la peinture du Titien. En ce qui concerne la réaffectation dans les cartes, le résultat est sensiblement identique. La carte obtenue avec la meilleure palette est cartographiquement acceptable dans le sens où elle présente six thèmes symbolisés différemment et suffisamment contrastés pour être lisibles. Les deux autres cartes ne sont plus lisibles : les objets restent parfois identifiables grâce aux contrastes clair-obscur mais le message cartographique est perdu par manque de structuration et de hiérarchisation de l'information.

Résultats Concernant la comparaison des méthodes, nous concluons que la méthode des K-Means est la plus efficace. Des améliorations sur les méthodes de clustering testées sont proposées en conclusion du papier. Concernant la comparaison des espaces de couleur, les résultats nous confirment qu'il est plus judicieux d'effectuer ces travaux dans l'espace de couleurs CIELab.

Conclusion Une conclusion importante du papier est de souligner que nous avons extrait des palettes de couleurs significatives d'une peinture source, sans a priori lié au domaine cartographique : nous devons donc maintenant confronter ces palettes de couleurs aux diverses contraintes explicitées précédemment, afin de superviser l'extraction de couleurs, en ciblant certaines familles de couleurs ('il me faut au moins un bleu et un vert'), des caractéristiques sur les couleurs ('je veux des couleurs très différentes et des couleurs proches', 'je veux des dégradés', par exemple), ou le nombre des couleurs ('je veux 5 couleurs', 'je veux beaucoup de couleurs', par exemple).

2.3 Caractérisation d'une relation complexe entre couleurs : harmonie(s)

Un aspect important du problème du contraste est la répartition spatiale des couleurs impliquées dans le contraste, décrit comme le contraste de quantité par Itten (1967). Jusque là l'évaluation de la qualité des contrastes se base sur des ensembles de couleurs décorrés de leurs implantations spatiales (ponctuelle, surfacique, linéaire) et relations topologiques (adjacence, séparation par un contour d'une couleur tierce, etc.) avec d'autres couleurs. Il existe déjà des règles sur l'harmonie des couleurs provenant de la théorie des couleurs et proposées aux utilisateurs dans les outils en ligne précédemment présentés. En informatique graphique, des travaux se sont concentrés sur la proposition de nouveaux modèles d'harmonie (Cohen-Or et al., 2006), sur des expérimentations auprès d'utilisateurs pour évaluer l'harmonie de deux couleurs entre elles mettant en avant la difficulté de sa modélisation et la question de la relation entre harmonie et ordre des couleurs (Ou and Luo, 2006), ou sur la colorisation automatique d'images à partir du contraste de quantité (Sauvaget et al., 2010). Les connaissances en art et en visualisation (Kandinsky, 1989; Sawahata, 2001; Sutton and Whelan, 2004; Gage, 2006) nous permettent d'envisager d'utiliser l'harmonie comme une relation de contraste complexe entre les couleurs d'une palette pour la conception cartographique.

Cette section présente les résultats du stage de Hugo Roussaffa, (Université Paris 1, M1 Géographie), co-encadré avec Christine Zanin (Université Paris 7), sur la caractérisation de l'harmonie en cartographie, ayant donné lieu à une publication à l'ICC 2011 (Roussaffa, 2009; Christophe et al., 2011).

A partir d'une analyse du vocabulaire dans les définitions de l'harmonie, ainsi qu'un questionnaire réalisé auprès d'étudiants en géographie sur leur définition de l'harmonie des couleurs⁹, nous avons proposé une définition basée sur deux caractéristiques importantes de l'harmonie : la **liaison**, i.e. en musique "une suite d'accords tels que les sons qui forment le premier subsistent encore dans le second.", et l'**équilibre**, i.e. "juste proportion" ou "distribution égale des masses dans un tableau" (Littré). Nous avons proposé tout d'abord des outils et des mesures pour qualifier la liaison et l'équilibre dans une palette de couleurs. Puis nous avons proposé une note d'harmonie d'une palette de couleurs, seule ou appliquée à un jeu de données cartographiques, composée de notes sur ces caractéristiques.

Pour qualifier le niveau de liaison d'un ensemble de couleurs, nous avons cherché à construire des familles chromatiques, i.e. des groupes de couleurs proches, et à analyser les distances (perçues) entre ces familles : il est en effet difficile de raisonner sur l'ensemble des couleurs, même sur le cercle chromatique

9. Cf. rapport de stage pour plus de détails sur ces aspects (Roussaffa, 2009).

pour lequel nous n'avons pas d'outil permettant d'identifier des familles de couleurs, par exemple "la famille des verts". Pour qualifier le niveau d'équilibre des couleurs dans la carte, nous avons considéré la variété des couleurs (les couleurs doivent appartenir à des familles de couleurs variées) et le contraste de quantité défini par Itten : "rapport de grandeur de deux ou plusieurs couleurs. Il s'agit du contraste beaucoup-peu ou du contraste grand-petit" (Itten, 1977).

2.3.1 Classification des couleurs en familles chromatiques : mesures de distance pour la liaison et l'équilibre

Familles chromatiques Une classification ascendante hiérarchique (CAH) a été réalisée sur l'ensemble des mesures de contraste établies par (Buard and Ruas, 2007, 2009) : le critère de distance utilise les notes des matrices de teinte et de clarté de (Buard and Ruas, 2007, 2009), le critère d'agrégation est le critère de Ward (Ward, 1963). Une CAH est effectuée indépendamment sur chacune des matrices et permet d'obtenir 13 classes de teintes et 5 classes de valeurs (de très claire à très foncée). Dans chaque classe de teinte, les couleurs sont regroupées selon les classes de valeurs : 13 familles chromatiques sont ainsi créées. Une famille chromatique se définit alors comme un ensemble de couleurs dont les teintes sont très proches et les valeurs varient selon les 5 niveaux possibles. La figure 2.7 présente ces treize familles chromatiques : gris-bleu (1), bleu-violet (2), cyan (3), jaune-orange (4), marron-ocre (5), orange-ocre (6), gris-taupe (7), vert (8), magenta (9), violet (10), noir (11), blanc (12), gris (13). Les familles 11, 12, 13 (noir, blanc, gris) sont des familles neutres. Les familles 1, 5, 7 (gris-bleu, marron-ocre, gris-taupe) sont des familles de transition. Nous soulignons que les familles ne sont pas homogènes en termes de ressemblance entre familles et entre couleurs. La *variance intra-famille* est calculée pour chaque famille : la classe cyan (3) a la variance la plus faible (2,5) et la classe Magenta (9) a la variance la plus forte (15,5).

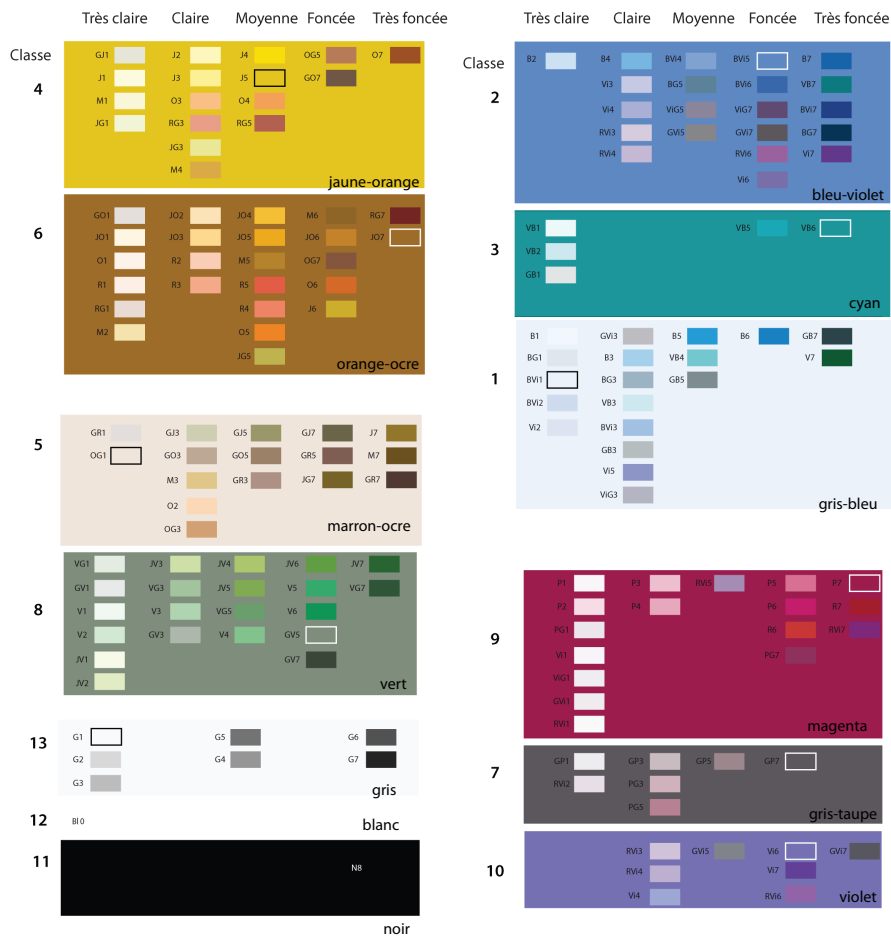


FIGURE 2.7 – Familles chromatiques (Roussaffa, 2009; Christophe et al., 2011)

Caractérisation de la liaison entre familles Les limites entre familles permettent de mesurer ce que nous appelons **distance de liaison**, la mesure synthétique de proximité entre les couleurs. Les couleurs sont liées entre familles par **effet de chaînage**. Certaines couleurs vont jouer le rôle de **mailles** pour la liaison entre deux familles : nous nous appuyerons sur ces couleurs par la suite pour assurer la cohésion des couleurs de l'utilisateur. Ainsi, pour lier des couleurs dont la distance de liaison est 2, il faut déterminer la couleur intermédiaire qui permet de les relier par deux distances de liaison égales à 1. Ainsi, nous utilisons les distances inter-classes mesurées lors de la CAH. Par exemple, les classes jaune-orange (4) et orange-ocre (6) sont les plus proches (distance=2,8), et elles sont aussi les plus éloignées de la classe gris-taupe (7) (distance=25,5). La **médiane des distances inter-classes mesurées** (égale à 12,5) lors de la CAH permet de définir le **seuil de liaison** entre deux classes (2 classes de teintes/valeurs sont liées quand elles sont à moins de 12,5 unités de distance). Deux couleurs peuvent donc être de la même famille et liée (niveau 0), ou, pas de la même famille et liée (niveau 1) ou pas (niveau 2), permettant de définir 3 niveaux de liaison. Par ailleurs des classes de familles différentes et liées (niveau 1) permettent de servir de maillage dans un chaînage des couleurs entre familles différentes. Trois types de liaison entre couleurs sont ainsi définis :

- distance de liaison 0 : les couleurs sont de la même famille, très proches et liées ; exemple : les couleurs de la classe jaune-orange (4).
- distance de liaison 1 : les couleurs ne sont pas de la même famille, mais sont liées ; exemple : les couleurs de la classe jaune-orange (4) et de la classe orange - ocre (6) (distance inter-classe la plus faible égale à 2,8).
- distance de liaison 2 : les couleurs ne sont pas de la même famille et ne sont pas liées directement ; exemple : les couleurs de la classe jaune-orange (4) ne sont pas liées aux couleurs de la classe vert (8) (distance inter-classe égale à 14) ; cependant les classes (4) et (8) sont chacune liées à la classe (6) qui sert donc de liaison entre ces deux classes.

En faisant la même recherche pour chaque classe respectivement de teinte et de valeur, nous obtenons tous les chaînages possibles entre les classes respectivement de teinte et de valeur, de proche en proche. Nous observons que les classes de teintes proches sont de même température : chaude, froide ou tiède. Cette caractérisation pourrait être utilisée pour caractériser le niveau d'harmonie d'une combinaison de couleurs choisies par un utilisateur.

2.3.2 Critères d'évaluation de l'harmonie des couleurs

Nous proposons trois critères pour évaluer une palette de couleurs qui vont être combinés ensuite en une note finale de l'harmonie.

Liaison entre les couleurs (C1) Pour une palette de couleurs donnée, si toutes les teintes (ou valeurs) sont liées, alors le score est égale à 1. Le score de liaison pour une palette est donc la somme des scores pour les teintes et les valeurs et varie entre 0 et 2.

Équilibre entre les couleurs (C2) L'équilibre est caractérisé par une certaine variété des couleurs choisies par l'utilisateur : il s'agit soit de vérifier que les teintes (ou les valeurs) des couleurs de l'utilisateur sont suffisamment contrastées (distances de liaison 1 et 2). Si les couleurs de l'utilisateur font partie des mêmes classes de teintes et de valeurs, elles ne sont pas assez contrastées et sont non équilibrées. Pour une palette donnée :

- Si les teintes (ou les valeurs) sont liées (liaison=0), alors elles ne sont pas équilibrées (score=0).
- Si les teintes sont liées (liaison=0) et les valeurs sont plutôt contrastées (liaison = 1 ou 2), cela signifie que les teintes sont dans la même classe avec un dégradé de valeurs : les valeurs sont en équilibre (score = 1). (et inversement pour le cas des teintes contrastées et pas les valeurs).

Équilibre de la relation entre les contrastes intrinsèques et spatiaux (C3) Notre hypothèse est que l'harmonie dépend d'une relation entre des contrastes intrinsèques (teinte, valeur, etc.) et des contrastes spatiaux (forme, taille, proximité, distribution, etc.). Cependant, il est difficile de déterminer quel type et même quel degré de relation existe entre ces deux contrastes. A partir de (Itten, 1967), nous considérons que la modification du ratio de surface entre les couleurs est fonction du niveau de contraste de teinte et de valeur : l'augmentation du contraste de valeur implique la perception de l'augmentation du ratio de surfaces. Nous proposons donc une mesure simple de cette relation entre les contrastes de teinte et de valeur (contrastés intrinsèques) et de surfaces (contrastés spatiaux) : plus le rapport de surfaces est fort entre deux objets, plus le contraste de teinte ou de valeur doit être fort pour équilibrer le

rapport de dominance entre couleurs. Trois seuils ont été déterminés empiriquement à partir des travaux de (Chesneau, 2006)¹⁰ :

- rapport équilibré des surfaces si le quotient de surfaces entre deux couleurs est dans l'intervalle $[1;4[$.
- rapport moyennement équilibré des surfaces si le quotient de surfaces entre deux couleurs est dans l'intervalle $[4;16[$.
- rapport pas du tout équilibré des surfaces si le quotient de surfaces entre deux couleurs est dans l'intervalle $[16;+\infty[$.

2.3.3 Évaluation : mesure de l'harmonie des couleurs

Évaluation de la liaison et de l'équilibre d'un ensemble de palettes de couleurs La figure 2.8 montre différents exemples de palettes choisies par un utilisateur, qui sont qualifiées au regard de la liaison et de l'équilibre de leurs couleurs :

1. les couleurs ne sont pas liées ($C1=0$) ;
2. les valeurs sont liées, mais pas les teintes ($C1=1$) ;
3. les couleurs sont liées ($C1=2$) : a) la combinaison est un camaïeu : variation des valeurs d'une teinte ($C2=1$). b) la combinaison est une variation de teintes ($C2=1$) ;
4. les couleurs sont liées ($C1=2$) et équilibrées ($C2=1$) : il y a à la fois variation des teintes et des valeurs. a) et b) sont la même combinaison de couleurs disposées dans un ordre différent.

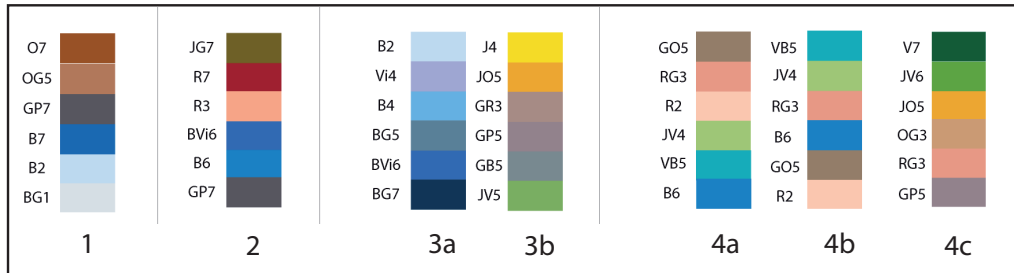


FIGURE 2.8 – Exemples de combinaisons colorées (Roussaffa, 2009)

Évaluation de l'équilibre de la relation surfaces/couleurs (C3) Le principe de cette évaluation consiste à dire que **plus le rapport de surface est fort entre deux objets cartographiques dans la carte, plus le contraste de teinte ou de valeur doit être fort**, pour équilibrer le rapport de dominance. Nous utilisons le rapport de la surface totale occupée par chaque type d'objet géographique sur la surface totale du jeu de données et une mesure du type de répartition des objets (grandes/petites surfaces continues, densité). Les couches bâti, forêt et mer ont des rapports de surface proches de 1 (les surfaces totales sont respectivement $1100m^2$, $1200m^2$, $1600m^2$). Pour discriminer ces trois types d'objets, nous choisissons de nous appuyer sur une information de la répartition de ces objets géographiques : le bâti est composé de petits objets répartis sur l'ensemble de la carte, la forêt est composée d'aplats de tailles variées, la mer est composée d'un aplat continu. Un autre facteur concernant les réseaux linéaires pourrait être ajouté intégrant l'idée d'empreinte spatiale : quelle est la forme du réseau linéaire ? Est-ce que les linéaires sont circonscrits à une zone du jeu de données ou est-ce qu'ils traversent tout le jeu de données ?

Nous appliquons la palette de couleurs 4a de la figure 2.8, à un même jeu de données géographiques, mais à des thèmes géographiques différents. La figure 2.9 montre les deux cartes obtenues, très différentes, en termes de perception des couleurs et des contrastes et donc également de l'harmonie des couleurs. Nous souhaitons donc être capables de fournir une mesure de l'harmonie des couleurs dans la carte et non uniquement dans la palette de couleurs en entrée. Un des objectifs de ce travail est de chercher des seuils à partir desquels l'équilibre du contraste de quantité est modifié. À partir des travaux d' Itten (1967), nous considérons que le rapport de surface entre les couleurs évolue en fonction de l'importance des contrastes de teinte et de valeur : un objet disposé sur une surface de grande taille paraîtra plus grand si un contraste de teinte ou de valeur fort les différencie. Pour la carte à gauche de la figure 2.9 :

10. La surface pour laquelle on calcule le rapport est toujours l'objet qui a la plus grande surface dans la carte.

- mer/fond : ratio de surface équilibré et couleurs très contrastées (C3=0)
- forêt/fond : ratio de surface moyennement équilibré et couleurs moyennement contrastées (C3=1)
- cimetière/fond : ratio de surface pas équilibré et couleurs pas assez contrastées (C3=0)
- bâti/fond : ratio de surface moyennement équilibré et couleurs moyennement contrastées (C3=1)
- routes/ fond : ratio de surface moyennement équilibré et couleurs moyennement contrastées (C3=1)



FIGURE 2.9 – Application d’une même palette de couleurs à différents thèmes d’un même jeu de données géographiques (Roussaffa, 2009)

Évaluation finale À partir de l’analyse des critères proposés, liaison, équilibre et contraste de quantité, nous avons proposé une mesure simple de l’harmonie dans une carte : $\langle \text{score C1} \rangle + \langle \text{score C2} \rangle + \langle \text{score C3} \rangle$. La carte à gauche a un score final de 6/8 (2 + 1 + 3), alors que la carte à droite a un score final de 7/8 : la carte de droite est plus harmonieuse que la carte de gauche.

Conclusion Ce travail nous a permis de mettre en évidence des relations particulières entre les couleurs, liaison et équilibre, et de proposer une mesure de ces relations. Nous avons ensuite proposé une mesure de l’harmonie prenant en compte les critères de liaison, d’équilibre et de qualité du contraste de quantité. Nous obtenons de premiers résultats intéressants pour évaluer le choix d’une combinaison de couleurs par un utilisateur. Des tests pour caractériser le niveau d’harmonie d’une carte et pour valider des critères d’évaluation de l’harmonie sont en cours de traitement. Cette proposition a permis de fournir des métriques qui ont été testées à la main sur des cas et validées par des utilisateurs. Néanmoins, elles n’ont pas été implémentées dans le prototype de ma thèse. Elles restent donc à valider.

2.4 Optimisations manuelles et automatiques de contraintes sur l’utilisation des couleurs

Dans cette section, je présente un ensemble de travaux mettant en œuvre les connaissances formalisées dans les travaux précédents, concernant la perception des couleurs, les relations entre les couleurs (contrastes, harmonie) et des règles traditionnelles et artistiques d’utilisation des couleurs en cartographie. Il s’agit donc de spécifier et optimiser des contraintes sur l’utilisation des couleurs pour concevoir des représentations graphiques, qui répondent à des objectifs variés, correspondants à des usages potentiels des données géographiques et de leurs représentations graphiques.

Trois travaux de recherche sont présentés dans cette section : la satisfaction de contraintes traditionnelles et artistiques au cœur de mon travail de thèse (Dominguès et al., 2009; Christophe, 2009a, 2010, 2011, 2012b,d,c), la conception de cartes Pop Art par l’optimisation manuelle d’arrangement de couleurs et de grain en collaboration avec Charlotte Hoarau (Christophe et al., 2012; Christophe and Hoarau, 2012), et l’optimisation de la visibilité de la représentation du bâti dans des séries diachroniques par la gestion du recouvrement dans le cadre du stage de fin d’études de Cécile Remy que j’ai co-encadré avec Julien Perret (Remy, 2014).

2.4.1 Satisfaction de contraintes traditionnelles et originales "à la manière des peintres"

Problématique Afin d'aider un utilisateur à concevoir des légendes personnalisées et originales, j'ai proposé dans le cadre de ma thèse, un système appelé COLLEG (ColorLegend) basé sur un modèle de dialogue pour aider l'utilisateur dans cette démarche créative, composé entre autres d'une méthode coopérative de conception se décomposant en interactions homme-machine. Pendant la conception, différents types de contraintes sont stockées : le système doit satisfaire ces contraintes et proposer des légendes variés à l'utilisateur. *La partie concernant les démarches globales de conception et les interactions avec l'utilisateur, donc la méthode de conception coopérative et le modèle de dialogue contrôlant la conception, seront présentés dans la section 2.6. Dans cette section, je présente les règles variées d'utilisation de la couleur et leur représentation sous forme de contraintes courantes, ainsi que le moteur de satisfaction de contraintes, à partir de peintures comme sources d'inspiration, dans l'objectif de concevoir des cartes variées "à la manière des peintres". Je résume l'étape 3 "Interprétation des préférences et construction de légendes adaptées", i.e. gestion de contraintes, de la méthode coopérative présentée en section 2.6.1 et par la figure 2.37 (Christophe, 2009b, 2011).*

Règles d'utilisation de la couleur en cartographie La connaissance théorique et pratique sur la manipulation de la couleur dans le domaine artistique est importante à considérer en cartographie (Chesneau, 2006; Christophe, 2009a; Christophe et al., 2013). Dans le cadre de ma thèse (Christophe, 2009a), j'ai reformulé les points de vue de Chevreul sur le contraste simultané (Chevreul, 1839), le point de vue de Johannes Itten sur les sept contrastes (couleur en soi, clair-obscur, chaud-froid, complémentaires, simultané, qualité ou saturation, et quantité) (Itten, 1967), et le point de vue d'Albers sur les interactions entre couleurs (en particulier une re-inversion du contrastes simultané et le questionnement sur la perception des frontières entre couleurs adjacentes)(Albers, 1963). En manipulant les trois dimensions de la couleur et les contrastes de couleurs, il est possible de mettre en évidence des informations de natures différentes : densités, oppositions entre thèmes, thème dominant, etc. (Mersey, 1990; Brewer, 1992; Klippel et al., 2009).

J'ai proposé de travailler avec trois grands types de règles pour la cartographie topographique (Christophe, 2009a, 2011). Tout d'abord, les règles dites *sémantiques* (ordre, association, différence) provenant de la hiérarchisation visuelle de l'information, issue de la perception visuelle (Bertin, 1967) et ont été décrites et formalisées en cartographie en amont de mes recherches (Chesneau, 2006; Buard and Ruas, 2007, 2009). Ensuite, la règle dite de contraste avec le fond provient d'une pratique traditionnelle en cartographie et du principe de la distinction figure-fond de la perception visuelle. Enfin, les règles dites conventionnelles proviennent des conventions culturelles sur l'usage des couleurs pour représenter des entités du monde réel (Cf. (Robinson et al., 1995) pour plus de détails sur l'utilisation conventionnelle des couleurs en cartographie, entre autres). J'ai ainsi formalisé ces trois types de règles, existants donc plus ou moins explicitement en cartographie, afin de fournir des règles sur les contrastes attendus sur les couleurs à utiliser (Christophe, 2009a, 2011) :

1. Les **règles sémantiques** sont caractérisées par un type de relation entre les thèmes de la légende (différence, association, ordre) et un niveau de contraste de teinte et de valeur (faible, moyen, fort) : "Si un thème 1 et un thème 2 ont une relation R, alors leurs couleurs doivent porter une relation R" ;
 - (R1) si Relation(T1,T2)=différence alors le contraste de teinte entre les couleurs de T1 et T2 doit être fort ;
 - (R2) si Relation(T1,T2)=association alors le contraste de teinte entre les couleurs de T1 et T2 doit être faible ;
 - (R3) si Relation(T1,T2)=ordre alors le contraste de teinte entre les couleurs de T1 et T2 doit être faible et alors le contraste de valeur entre les couleurs de T1 et T2 doit être fort ;
2. La **règle de contraste du fond** : "Si un thème constitue le fond cartographique, alors les contrastes de teinte et de valeur entre ce thème et les autres thèmes doivent être forts"; Cette règle est généralement interprétée comme "le fond cartographique doit être clair, alors que les autres thèmes doivent être plus foncés".
 - (R4) si un thème a pour qualité d'être le fond cartographique alors la valeur de sa couleur doit être faible par rapport à celles des autres thèmes.
3. Les **règles conventionnelles** sont caractérisées par une relation entre la sémantique du thème et une famille de couleurs privilégiée : "Si le thème 1 porte telle sémantique, alors la couleur du

thème doit être conventionnelle pour cette sémantique."

- (R5) Si un thème représente la mer, alors sa couleur doit faire partie de la famille des bleus.
- (R6) Si un thème représente la végétation alors sa couleur doit faire partie de la famille des verts.

Afin de manipuler des couleurs plus originales en cartographie, et surtout des combinaisons de couleurs plus originales, j'ai proposé de travailler sur la sélection de palettes de couleurs à partir de peintures, pour la cartographie. J'ai ainsi sélectionné des peintures plutôt célèbres et assez différentes les unes des autres, en termes de style de peinture et de couleurs utilisées. Pour chacune de ces peintures, j'ai sélectionné moi-même les couleurs que je jugeais être représentatives de chaque peinture, dans un ensemble d'environ 12 couleurs : la figure 2.10 présente l'ensemble des peintures étudiées associées chacune à sa palette de couleurs, extraites manuellement. Pour chaque palette de couleurs extraite d'une peinture, j'ai associé un ensemble de **règles de composition, dites "du peintre"** explicitant la façon dont les couleurs sont agencées dans la peinture finale : ce sont donc des règles de composition, et non des règles sémantiques. Pour chaque palette artistique, j'ai décrit pour chaque couleur, son type de répartition (petit ou grand aplats, pointillés), son type de voisinage avec d'autres couleurs (adjacence par exemple). La figure 2.11 présente la palette extraite de la peinture de Matisse, ainsi que les règles de composition du peintre. Les règles de composition des autres peintures sont décrites dans mon mémoire de thèse (Christophe, 2009a). L'objectif est de pouvoir associer une couleur du peintre utilisée pour représenter des petits objets dans la peinture, à la représentation des petits objets dans la carte, et d'aligner ainsi les géométries et leur représentation graphique.



FIGURE 2.10 – Peintures et palettes de référence (Christophe, 2009a)

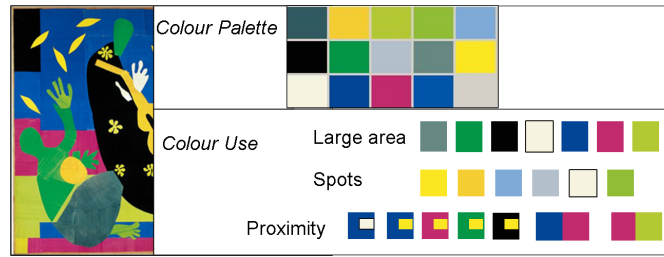


FIGURE 2.11 – Peinture de Matisse, sa palette et ses règles de composition (Christophe, 2011)

Représentation des contraintes courantes Les contraintes courantes sont de différentes natures car proviennent potentiellement de différentes sources :

- *cartographiques* provenant des connaissances en sémiologie graphique, perception visuelle et cartographie : il s'agit des règles sémantiques et conventionnelles établies précédemment, dont la modélisation est donnée par la figure 2.12 : les contraintes cartographiques sont portées par la légende.
- *artistiques* provenant de la théorie des couleurs et des pratiques en peinture établies précédemment, dont la modélisation est donnée par la figure 2.12 : les peintures sont représentées par leur palette de couleurs et les règles de composition de la peinture en contraintes artistiques. Trois attributs principaux sont donnés : type de répartition type, surface moyenne et voisinages.

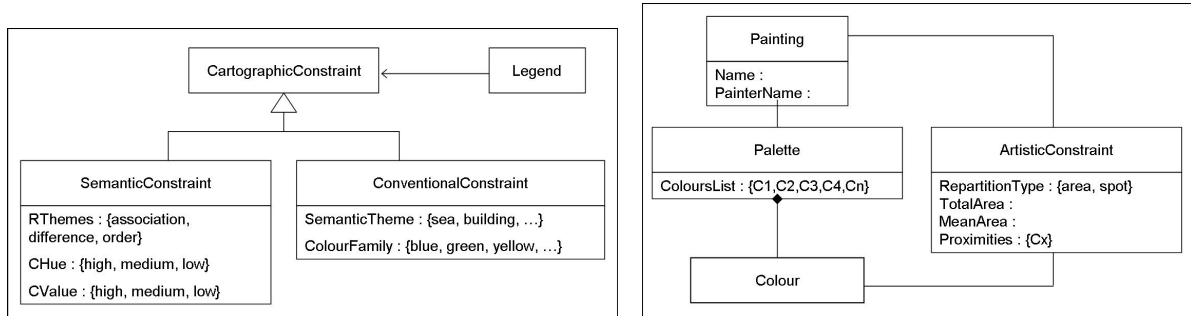


FIGURE 2.12 – Représentation des contraintes cartographiques (à gauche) et artistiques (à droite) (Christophe, 2011)

- *utilisateurs* provenant des préférences émises par les utilisateurs, pour un thème cartographique spécifique ou non : ce sont des ensembles de *couleurs possibles* assignées ou non à un thème (Cf. paragraphe suivant).

Représentation des préférences de l'utilisateur Les sources d'inspiration, cartes et échantillons, vont être proposées à l'utilisateur pour lui faire exprimer ses préférences de couleurs sur les thèmes à cartographier. Les préférences de l'utilisateur vont s'exprimer sous la forme "*J'aime/je n'aime pas cette source d'inspiration*" (*préférence sur la source*), "*J'aime/je n'aime pas cette couleur*" (*préférence de couleur générale*). Elles peuvent aussi être exprimées en fonction d'un thème "*J'aime/je n'aime pas cette couleur pour le thème T*" (*préférence de couleur ciblée*). Il se peut également que l'utilisateur dise qu'il n'a pas d'avis (*pas de préférence*). Pour représenter ces préférences, nous stockons les couleurs possibles choisies par l'utilisateur dans un attribut de l'élément de légende ciblé, il s'agira de la légende en cours de construction (*LégendeTravail*) ou d'un thème de cette légende (*Thème*). Une liste de couleurs possibles peut donc être affectée au niveau de la légende ou au niveau de chaque thème. Il faut noter que des couleurs peuvent être affectées dans une liste spécifique, à chacun de ces objets, à partir d'une proposition du système lui-même. Un premier exemple vient de la règle sur le contraste avec le fond cartographique : le système attribue systématiquement le blanc comme couleur possible à ce thème. Un deuxième exemple est le cas où l'utilisateur exprime qu'il n'a pas de préférence et le système fait des propositions lui-même.

Interprétation et Satisfaction de contraintes La gestion des contraintes courantes implique deux actions différentes de la part du système : la *traduction des préférences de l'utilisateur en contraintes*,

puis la *construction de légendes à partir des contraintes courantes*.

1- Traduction des préférences en contraintes Cette étape consiste à interpréter les préférences émises par l'utilisateur sur la source d'inspiration, c'est-à-dire :

1. formaliser la préférence de l'utilisateur du type "*J'aime/Je n'aime pas X*" sous la forme :
 - <préférence>_<couleur>_<source_inspiration>_<cible> où
 - <préférence> prend les valeurs "++" ou "--" selon que l'utilisateur aime ou n'aime pas.
 - <couleur> prend le code de la couleur sélectionnée : code dans le système de référence des couleurs pour les échantillons ou code RVB pour les palettes.
 - <source_inspiration> prend la valeur du nom de l'échantillon ou du nom du peintre de la toile où la couleur a été sélectionnée.
 - <cible> prend la valeur " nom du thème " quand l'utilisateur a fait une préférence ciblée ou reste vide si la préférence est générale.

Exemples :

- (a) " ++_B5_energetique1_bati " pour "J'aime cette couleur de l'échantillon appelé energetique1 pour le thème bâti".
- (b) " --_205124204_matisse_route " pour "Je n'aime pas cette couleur de la palette Matisse pour les routes".
- (c) " ++_110101200_derain_ " pour "J'aime cette couleur de la palette Derain".
- (d) " --_RVI2_allemanne_ " pour "Je n'aime pas cette couleur dans l'échantillon européen allemand".
- (e) " --_energetique1_ " pour "Je n'aime pas l'échantillon appelé energetique1".
- (f) " --_ " pour "Je n'ai pas d'avis".

2. analyser la préférence "++" ou "--" de l'acte :
 - une préférence de couleur "++" implique une couleur possible pour l'utilisateur à affecter à la liste des couleurs possibles de la légende, si la préférence est générale, à un thème, si la préférence est ciblée.
 - une préférence de couleur "--" implique une couleur impossible à utiliser.

2- Construction de légendes à partir de contraintes Pour construire des légendes, le système déclenche deux étapes : la distribution des couleurs possibles dans les thèmes (a) puis l'application de ces couleurs pour construire un ensemble de légendes variées (b) en s'appuyant sur les contraintes courantes.

a- Distribution des couleurs possibles dans les thèmes Nous avons vu que l'utilisateur a pu exprimer des préférences générales ou des préférences ciblées qui ont entraîné respectivement l'affectation de couleurs possibles à la légende en cours de construction et à des thèmes. Les couleurs possibles affectées au niveau de la légende en cours de construction sont dans un premier temps automatiquement re-affectées aux thèmes de la légende, en fonction des contraintes courantes (choix de l'utilisateur : cartographiques ou artistiques). En respectant les règles cartographiques, les couleurs bleues sont affectées au thème Mer, les couleurs vertes sont affectées au thème Zone arborée, les couleurs les plus claires sont affectées au thème Commune, caractérisé comme fond cartographique, et les autres couleurs sont affectées à tous les thèmes restants, bâti, routes principales et secondaires. A la fin de cette étape, toutes les couleurs possibles, issues de l'utilisateur et du système, sont affectées au niveau des objets *Thèmes*. Il faut donc maintenant proposer une méthode pour gérer toutes les affectations possibles de couleurs dans une légende pour concevoir plusieurs cartes différentes (et les plus variées possibles).

b- Résoudre un problème à satisfaction de contraintes Construire une légende qui satisfait un ensemble de contraintes consiste à résoudre un *Problème à Satisfaction de Contraintes (Constraint Satisfaction Problem CSP)*. Ce problème est défini par un ensemble de **variables** $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ qui peut prendre un ensemble de **valeurs** possibles $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ qui doivent satisfaire un ensemble de **contraintes** $\{C_1, C_2, \dots, C_m\}$ (Petit, 2002), (Russel and Norvig, 2006). Dans notre contexte, les variables sont les thèmes, les valeurs sont les couleurs possibles pour ces thèmes (choisies par l'utilisateur ou par le système : listes CU et CS) et les contraintes sont les contraintes cartographiques. Différentes méthodes de résolution de CSP existent (Petit, 2002). Le problème peut être résolu par un algorithme récursif appelé *backtracking* (Golomb and Baumert, 1965). Le principe de cet algorithme appliqué à notre problème est le suivant : au début, tous les thèmes de la légende sont vides. À chaque étape, le système choisit un thème auquel on va attribuer toutes ses couleurs possibles (CU et CS), selon les contraintes courantes, puis passe au thème suivant. Le processus est reproduit pour chaque thème, jusqu'à ce que tous les thèmes se soient vu attribuer l'ensemble des couleurs possibles provenant de l'utilisateur et du

système. Nous appelons les légendes construites de cette façon des *légendes test*. Nous avons donc un arbre de résolution qui nous amène à la *construction de x légendes test*. Dès qu'une légende est construite, l'algorithme remonte jusqu'au premier nœud non développé et ainsi de suite. En premier lieu, seule la contrainte "tous les thèmes doivent avoir des couleurs différentes" est utilisée.

Deux remarques sont à faire :

1. **priorité des contraintes** : l'intérêt d'avoir séparé les couleurs possibles provenant de l'utilisateur de celles proposées par le système permet de gérer des priorités : les couleurs choisies par l'utilisateur sont appliquées en priorité par rapport aux couleurs choisies par le système. Ceci correspond à l'objectif de satisfaire les préférences de l'utilisateur en premier lieu.
2. **problème sur-contraint** : si le système est trop contraint par l'utilisateur, c'est-à-dire qu'il y a soit trop, soit trop peu de couleurs choisies par l'utilisateur, il peut ne pas trouver de solution et le problème est dit sur-contraint. Dans le cas où il y a trop de couleurs choisies, le système propose à l'utilisateur de relaxer certaines de ses contraintes en exprimant lesquelles sont prioritaires (*contraintes fortes*). Dans le cas où il y a trop peu de couleurs choisies, le système est capable de faire automatiquement et de façon implicite des propositions de couleurs possibles pour un thème en s'appuyant sur les contraintes cartographiques courantes : si le thème concerné est mer ou végétation, le système sélectionne des couleurs dans les familles de couleurs correspondantes, si le thème concerné est un autre thème différent de mer et végétation, le système sélectionne des couleurs qui respectent le contraste attendu.

3- Évaluation des légendes construites Dès qu'une légende est construite, elle est immédiatement évaluée : les contrastes de teinte et de valeur sont analysés pour chaque couple de couleurs dans la légende en utilisant les matrices de contrastes de (Buard and Ruas, 2007). Une note globale de contraste de teinte et une note globale de contraste de valeur sont attribuées à chaque légende construite.

Résultats cartographiques A partir de la peinture de Matisse, il est ainsi possible de concevoir, par exemple, les deux cartes de la figure 2.13 sur un jeu de données topographiques composé de 6 thèmes géographiques (mer, végétation, fond, bâti, routes principales et secondaires). A partir de la palette Matisse, respecter les contraintes artistiques signifie que les couleurs sont donc appliquées selon les règles de composition du peintre, en respectant les types de répartition et les voisinages de couleurs (carte à gauche). Ceci implique que le système soit capable de calculer les caractéristiques des objets cartographiques à rendre (surface, taille, forme et voisinages). Respecter les contraintes cartographiques signifie que les bleus sont utilisés pour la mer, les vert pour la végétation, et les couleurs claires pour le fond ; les autres couleurs sont appliquées aux autres thèmes en fonction des relations sémantiques de différence et d'association (carte de droite). Les deux cartes de la figure 2.13 sont donc des cartes possibles, chacune représentative d'un type de contraintes à respecter lors de l'affectation des couleurs dans la carte.



FIGURE 2.13 – Deux cartes possibles d'après Matisse : à gauche selon les règles de composition du peintre, à droite selon les règles d'usage en cartographie. (Christophe, 2011)

A l'aide des peintures, l'idée était de pouvoir laisser l'utilisateur explorer les capacités du système à appliquer les couleurs de façon différente et donc de générer des cartes variées, mais aussi d'explorer la potentialité de palette de couleurs originales. L'utilisateur, selon ses goûts et préférences peut ainsi manipuler les contraintes de deux façons différentes et explorer les résultats. Les figures suivantes présentent des résultats variés à partir du tableau de van Gogh (Cf. Figure 2.14) et du tableau de Derain (Cf. Figure 2.15).

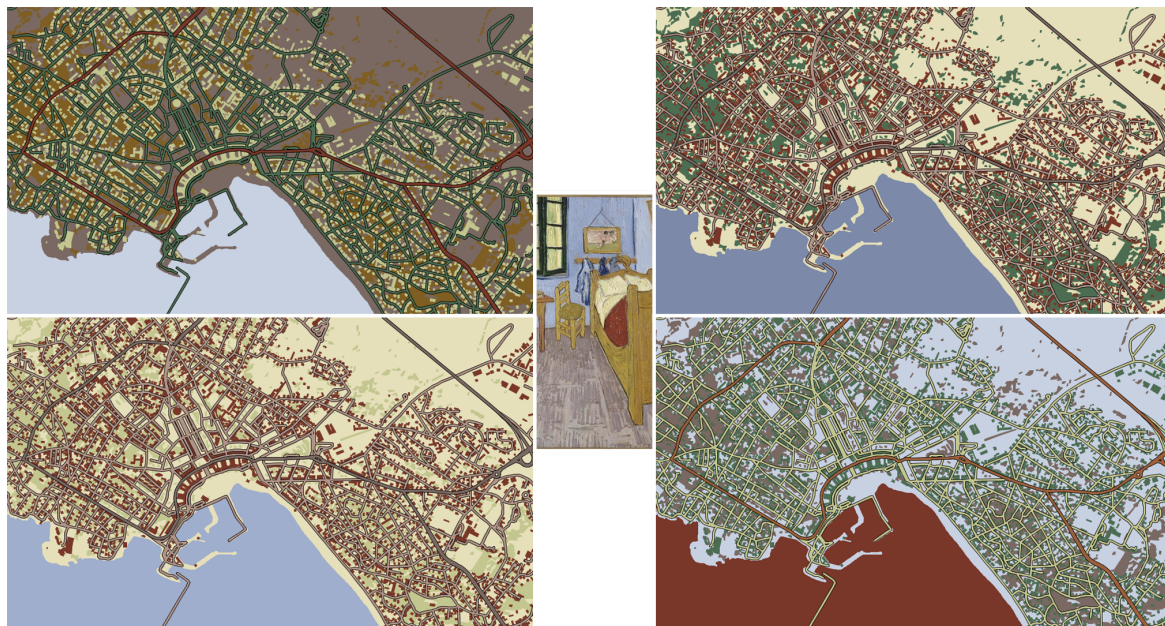


FIGURE 2.14 – Cartes possibles à partir du tableau de van Gogh (Christophe, 2011)

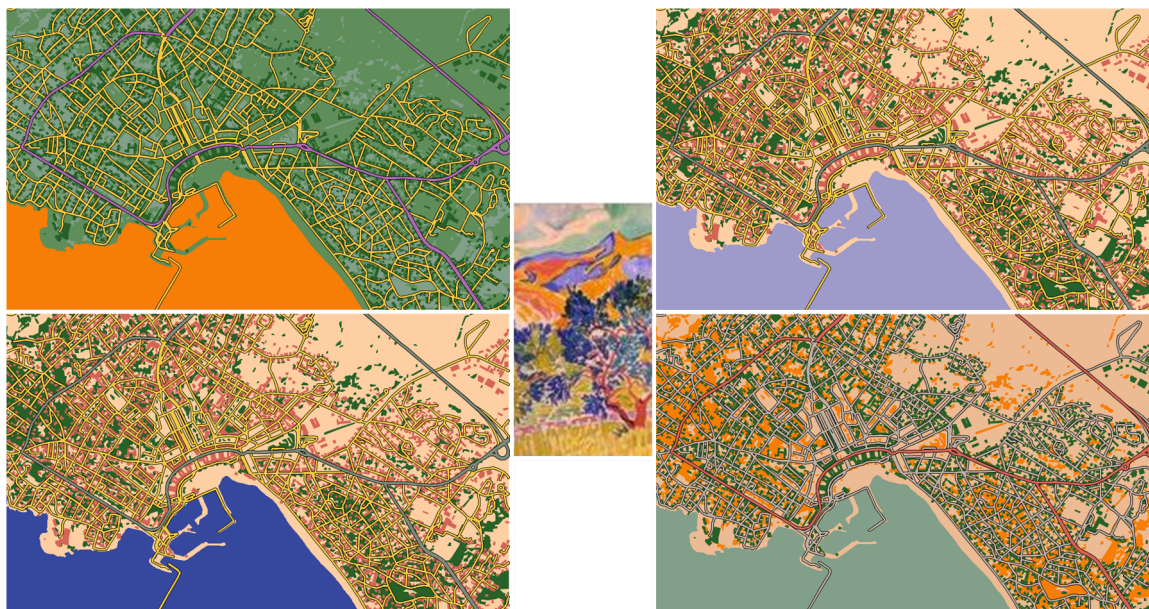


FIGURE 2.15 – Cartes possibles à partir du tableau de Derain (Christophe, 2011)

2.4.2 Arrangements de couleurs saturées, contrastes complémentaires et grain : Pop Art

Suite à mon travail de thèse, dans lequel une peinture est utilisée comme source d'inspiration pour concevoir une variété de cartes personnalisées "à la manière de cette peinture", nous nous sommes intéressées à la pertinence de considérer éventuellement d'autres caractéristiques visuelles saillantes de la source d'inspiration que la couleur. En parallèle, nous avons commencé à nous intéresser à la notion de style artistique ou graphique à reproduire. A la faveur d'un stage et dans la poursuite de ce travail de stage, avec Charlotte Hoarau, nous avons choisi de travailler sur la conception de cartes stylisées Pop Art, afin de formaliser les connaissances nécessaires sur les couleurs et les contrastes de couleurs, en particulier travailler sur les couleurs complémentaires que nous n'avions pas formalisées jusque là. Ce travail nous a amenées à re-explorer les propriétés visuelles du grain, et donc dans notre contexte, du grain coloré, nous permettant ainsi d'explorer des capacités de représentation graphique inattendues et

de pousser un peu les limites imposées de la sémiologie graphique.

Dans ce travail, nous questionnons la place de l'esthétique dans le processus de conception cartographique. En particulier nous revenons à la question de savoir si la qualité esthétique est corrélée à l'efficacité d'une carte. Nous répondons au papier d'Alexander Kent "Aesthetics : A Lost Cause in Cartographic Theory?" (Kent, 2005) qui souligne que certes l'esthétique a toujours joué un rôle important en cartographie mais qu'elle a été complètement oubliée dans les approches sur le processus de conception cartographique. De notre point de vue, l'esthétique pourrait être considérée comme un facteur essentiel de la qualité cartographique et devrait être à ce titre intégrée dans le processus de conception, nous nous référons alors à la notion d'Alexander Kent, "objectif esthétique" : la question reste de savoir sur quelles variables ou propriétés visuelles s'appuyer pour atteindre cet objectif esthétique en cartographie et c'est l'objectif de ce papier. D'autre part, l'esthétique est clairement une question de perception, ressenti, émotion, préférences des lecteurs et des utilisateurs de la carte, catégorisé par Alexander Kent en tant que "réponse esthétique" (ce point renvoie aux travaux réalisés avec Sara I. Fabrikant (Fabrikant et al., 2012, 2013) (Cf. section 2.5)). Une dernière caractéristique est l'"expérience esthétique" qui renvoie au vécu des utilisateurs, non seulement des espaces géographiques représentés mais aussi des pratiques de représentation et des représentations graphiques de ces espaces (ce dernier point renvoie en partie aux travaux de sur le style de rendu expressif et sur la thèse de Jérémie Ory, respectivement en sections 3.2 et 3.4).

Cette sous-section présente la méthodologie mise en œuvre pour concevoir des cartes stylisées Pop Art, lors du stage d'initiation à la recherche d'A. Kasbarian et A. Audusseau, co-encadré avec C. Hoarau (Audusseau and Kasbarian, 2012; Kasbarian et al., 2012; Christophe et al., 2012) : les résultats sont des recommandations sur l'utilisation de la couleur, des contrastes de couleurs, du grain et de la typographie pour faire des cartes Pop Art, en respectant les caractéristiques des objets cartographiques à représenter. ces travaux ont été poursuivis et étendus, avec C. Hoarau, afin de questionner le cadre existant de la sémiologie graphique dans une Special Issue sur l'esthétique dans la revue Cartographic Perspectives (Christophe and Hoarau, 2012). Je présente ici un résumé des papiers (Christophe et al., 2012) et (Christophe and Hoarau, 2012).

Problématique L'objectif esthétique visé s'appuie sur une gestion particulière de variables et de propriétés visuelles afin d'obtenir des arrangements spécifiques de formes et de couleurs. La question qui nous intéresse est de savoir quels arrangements l'on vise à obtenir ou conserver, et sur quelle(s) variable(s) visuelles s'appuyer pour concevoir de tels arrangements. En particulier, ici, ces arrangements doivent véhiculer l'idée de représentation Pop Art. La première difficulté consiste à définir ce que pourrait être un style Pop Art et pour ce faire, nous sommes parties de trois images représentatives du courant Pop Art pour extraire des caractéristiques visuelles sur les couleurs, leurs contrastes mais aussi les polices et le grain à utiliser. La deuxième difficulté a consisté à fournir des recommandations d'utilisation de ces variables visuelles pour concevoir des cartes Pop Art. Cette méthodologie a été mise en œuvre manuellement.

Sources d'inspiration et recommandations pour faire du Pop Art (Christophe and Hoarau, 2012) Les caractéristiques visuelles du mouvement Pop Art sont les suivantes, pour nous : des contrastes de couleurs complémentaires très saturées, des effets visuels de relief ou de sérigraphie, des bulles de textes avec une typographie spécifique de *cartoon*. Trois images ont été identifiées comme étant représentatives du mouvement Pop Art, car étant très connues et mettant en évidence ces caractéristiques visuelles (Cf Figure 2.16)¹¹.

A partir de ces images, des recommandations sémiologiques ont été explicitées afin de guider un cartographe dans la symbolisation Pop Art d'un jeu de données topographiques. Il ne s'agit pas ici de brider la créativité en imposant des contraintes, mais bien de permettre à un cartographe de contrôler ses effets visuels et l'expressivité de ses données et de sa carte finale. Une grille exhaustive a été fournie, spécifiant comment chaque thème géographique peut être représenté (couleurs) et comment il est impliqué dans des relations avec d'autres thèmes (contrastés de couleurs), en lui affectant couleurs, épaisseurs, typographies et contrastes issus des trois images sources.

- les couleurs élémentaires possibles par thème : les bleus possibles pour la représentation de la mer, les verts possibles pour la végétation, les autres couleurs possibles pour le fond cartographique et

11. un portrait de Marilyn Monroe par Andy Warhol (1962) ; une peinture de Roy Lichtenstein (1965) ; et une imitation de Warhol très connue, Che Guevara, par Gerard Malanga (1968).

- les routes, etc.
- les combinaisons de couleurs recommandées entre thèmes, par exemple les contrastes de couleurs complémentaires devant être respectés.
- les combinaisons de couleurs à éviter.
- les typographies les plus pertinentes.
- les épaisseurs des routes, des contours, etc.

A partir de ces recommandations, il est alors possible de prendre des caractéristiques visuelles de l'une ou de plusieurs de ces images pour concevoir des cartes stylisées Pop Art. Les contraintes d'utilisation de la couleur dans la carte sont des contraintes cartographiques (conventions, contrastes) sur des couleurs et contrastes de couleurs artistiques. En utilisant uniquement les contrastes de couleurs complémentaires et les couleurs saturées typiques de l'image Che Guevara, nous obtenons la carte A de la figure 2.16. En utilisant le principe des points Benday (technique d'impression colorée, sous forme de trames de points : en jouant sur l'espacement des points colorés, on peut obtenir des effets visuels variés), la typographie cartoon, les couleurs brillantes, les contours noircis et les contrastes spécifiques de l'image Marilyn Monroe, nous pouvons obtenir la carte B de la figure 2.16. En mixant les trois sources d'inspiration, une troisième carte, la carte C, peut être obtenue à partir du contraste bleu-vert du fond avec le rose de la peau depuis l'image de Marilyn, les couleurs brillantes du Che Guevara et les points Benday, les contours noirs et la typographie de Lichtenstein. Cette dernière carte est particulièrement intéressante, en particulier grâce au rendu du trait de côte : le tracé noir amplifie l'opposition entre la mer bleu-verte et la terre, et la représentation de la terre en points Benday colorés, rendent la carte vibrante. Le cartographe pourrait jouer maintenant avec différents niveaux de contrastes afin de nuancer ou au contraire souligner certaines caractéristiques à rendre saillantes. L'utilisation de ces caractéristiques Pop Art permettent ainsi de mettre en évidence certains objets de l'espace ou de jouer sur les niveaux hiérarchiques de lecture dans la carte.

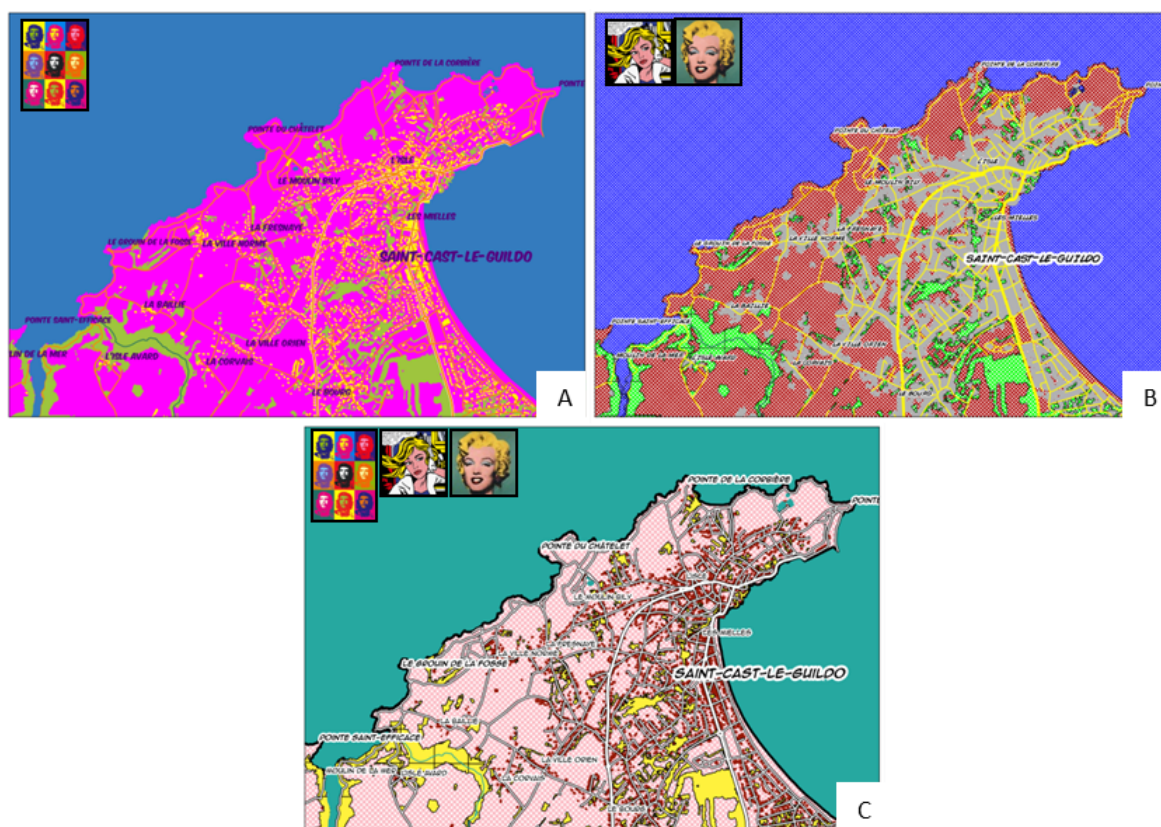


FIGURE 2.16 – Cartes Pop Art à partir d'images Pop Art (Christophe and Hoarau, 2012)

Ces cartes sont trois exemples possibles typiques mais de nombreuses possibilités existent pour concevoir des cartes Pop Art à partir des recommandations fournies.

Influence des données et des choix sémiologiques sur l'effet Pop Art (Christophe et al., 2012) Dans un objectif de validation des recommandations sémiologiques pour faire des cartes Pop Art, nous avons souhaité considérer l'influence des données géographiques et des choix sémiologiques sur l'effet Pop Art perçu. A partir d'une spécification sémiologique donnée (c'est-à-dire que toutes les variables visuelles sontinstanciées pour chaque thème géographique de la légende) qui marche bien sur un jeu de données géographiques, que devient l'effet Pop Art, mais aussi la lisibilité de la carte, si on applique cette spécification à un autre jeu de données. De plus, si on modifie la spécification sémiologique initiale, est-ce que l'on préserve l'effet Pop Art ? Afin de répondre à ces questions, nous avons construit une grille variant (un extrait de la grille est disponible dans la figure 2.17) :

- en colonne, selon le type d'espace géographique représenté : selon l'endroit où on se place dans la carte topographique, le rendu des objets cartographiques est différent puisque les répartitions spatiales des points, lignes, surfaces et textes évoluent dans la carte, entraînant éventuellement une modification de l'impression visuelle. Nous avons travaillé sur trois types d'espaces géographiques, i.e. habitat dispersé (a), zone côtière (b), zone urbaine (c), rendus avec la même spécification sémiologique.
- en ligne, selon la spécification sémiologique sélectionnée : elle varie en fonction des valeurs attribuées aux variables visuelles. Par exemple, entre les sémiologies 1 et 2, le rendu du fond cartographique évolue de points à un aplat de couleur, et la typographie est modifiée . Entre les sémiologies 2 et 3, les rendus de la mer et de la végétation sont inversés et la police change. Nous proposons 4 changements élémentaires de la spécification, fournissant ainsi une grille de 22 extraits de cartes.

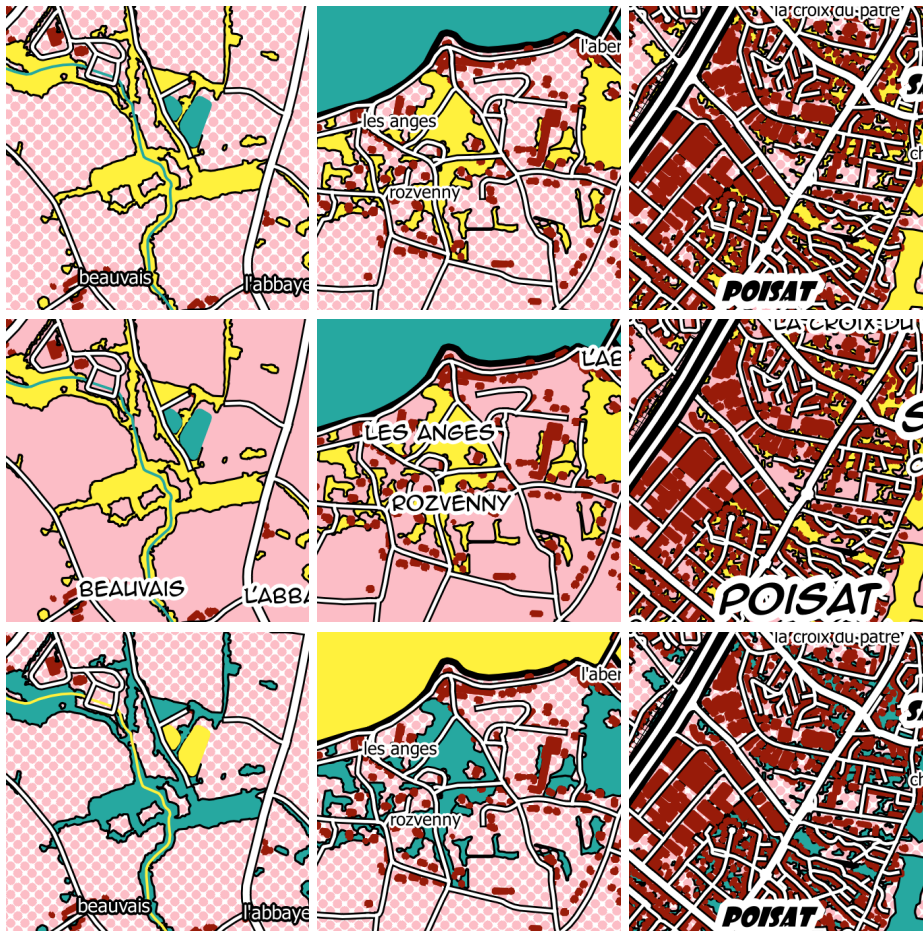


FIGURE 2.17 – Extrait de la grille d'évaluation ligne : spécification sémiologique / colonne : 1 type d'espace (colonne 1 : habitat dispersé; colonne 2 : zone côtière; colonne 3 : zone urbaine) (Christophe and Hoarau, 2012)

Cette grille de cartes sera un excellent support d'évaluation de la spécification sémiologique, pour différents jeu de données géographiques. Elle permet également d'affiner la spécification choisie, afin d'augmenter l'effet Pop Art ou d'améliorer la qualité de la carte, selon l'intention du cartographe.

Revisite sémiologique (Christophe and Hoarau, 2012) Ce travail nous a poussés à reconsidérer quelques principes sémiologiques, en tous cas à étendre le cadre existant aux contrastes de couleurs complémentaires et au grain coloré. Bertin n'a jamais été très explicite au sujet des couleurs¹² dans un contexte où l'impression limitait cette question.

Contrastes de couleurs complémentaires A l'instar de l'image Che Guevara, nous avons considéré qu'un espace géographique pourrait bénéficier de ce type de représentation, sous la forme de cartes répétées et représentées avec différents contrastes de couleurs saturées et complémentaires. Charlotte Hoarau a réalisé un ensemble de cartes, en préservant des contrastes complémentaires, les proportions de couleurs, et les arrangements initiaux de l'image pour concevoir la représentation Pop Art de Saint Cast le Guildo (Cf. Figure 2.18). La manipulation de ces contrastes nous permet d'obtenir un maximum d'effet de couleur et de lumière. L'œil humain quand il regarde une couleur, a tendance à percevoir sa couleur complémentaire : quand deux couleurs proches sur le cercle chromatique sont juxtaposées, ce contraste simultané est encore augmenté rendant la composition plus vibrante. Ainsi lorsque nous voyons un orange, notre œil crée automatiquement autour de cette couleur un halo avec sa couleur complémentaire (le bleu) : si le peintre a placé à côté du orange, une couleur bleue, celle-ci apparaît à notre œil plus lumineuse, plus saturée encore qu'elle ne l'est réellement. L'image Che Guevara en bas à droite présente ce contraste complémentaire bleu-orange. Dans la mini-carte correspondante, la végétation rendue en orange est donc plus vibrante, plus saillante. Ce type de contrastes pourraient être très utiles pour mettre en valeur certaines données dans la carte.



FIGURE 2.18 – Saint Cast le Guildo en style Pop Art (Christophe and Hoarau, 2012)

Cette façon de présenter une image reproductible en masse, avec des jeux de couleurs variés, pourrait être utilisée en cartographie pour présenter le résultat de l'application de différentes spécifications de couleurs, afin que l'utilisateur puisse choisir la carte qui lui convient le plus selon ses besoins. La figure 2.19 présente différentes variations de présentation pouvant être proposées pour comparer ces différentes spécifications de couleurs : comme décomposer l'espace géographique à représenter en différentes zones sur lesquelles appliquer différentes spécifications.

Points Benday et grain de Bertin Utiliser les points Benday, technique d'impression colorée pour jouer sur les impressions visuelles de celui qui regarde une image, nous fait revisiter le concept de la variable visuelle grain de Bertin. Le grain selon Bertin : "... correspond à la variation d'un figuré conservant le même rapport du noir au blanc. C'est le principe de l'agrandissement ou de la réduction photographique." et elle est difficile à réaliser manuellement. Différentes propositions ont été faites dans

12. "La couleur est un luxe inutile."



FIGURE 2.19 – Différentes présentations possibles pour sélectionner une spécification de couleurs pour Saint Cast le Guildo en style Pop Art (Christophe and Hoarau, 2012)

le papier, en particulier pour la cartographie thématique. En cartographie topographique, les textures de points peuvent être utilisées pour représenter le fond cartographique (dans notre jeu de données, les communes) : il s'agit d'adoucir les effets de contrastes complémentaires Pop Art, un peu trop saturés, afin d'améliorer l'efficacité de la carte. Nous avons expérimenté différentes tailles de points : en effet si les points sont trop gros ou trop saillants (rapport entre taille et couleur), on perd l'effet recherché par les points Benday (créer un effet visuel sans pour autant voir les points initiaux). La figure 2.20 présente quelques résultats qui pourraient être utilisés dans des expérimentations futures sur des variations de texture à contrôler (disposition des points, espaces entre les points ou formes initiales à modifier).

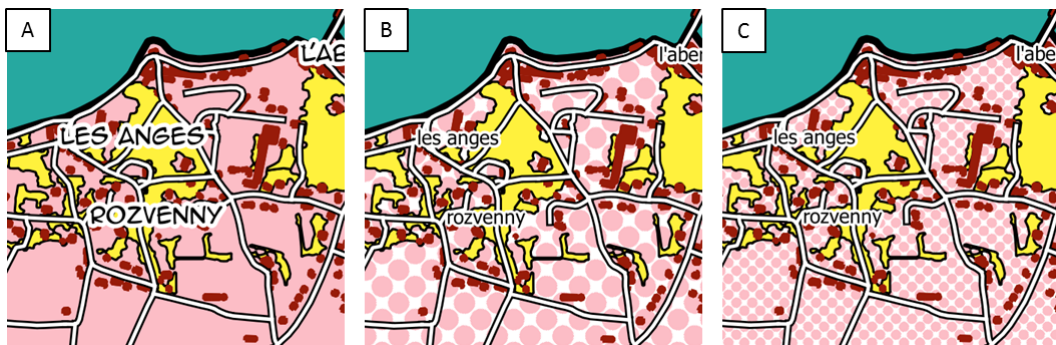


FIGURE 2.20 – Variations en point sur le fond cartographique (Christophe and Hoarau, 2012)

Conclusion Ces propositions ont pour but de faire converger et réconcilier les concepts initialement décrits par Kent (2005), objectif et réponse esthétiques, en cartographie. Notre objectif est toujours de concevoir des cartes de qualité, en contrôlant une impression visuelle, ici Pop Art. Cette méthodologie peut être empruntée pour manipuler des styles artistiques comme des styles classiques en cartographie et permettre de satisfaire les besoins des utilisateurs tout en préservant la lisibilité et l'efficacité de la carte. Nous visons de pouvoir personnaliser l'expressivité des cartes par l'expressivité des variables visuelles.

2.4.3 Optimisation de la visibilité des textures (gestion du recouvrement)

Cette sous-section présente les résultats du travail de stage de fin d'études de Cécile Remy, "Sémiologie graphique pour la représentation des dynamiques urbaines : identification et modélisation de connaissances pour la conception de cartes diachroniques efficaces en superposition. Application à l'évolution du bâti en milieu urbain", M2 Information Géographique, ENSG/UPÉMLV (Remy, 2014). J'ai co-encadré ce stage avec J. Perret.

Problématique La modélisation de la ville comme tissu urbain évolutif et sa représentation cartographique sont deux moyens d'abaisser la complexité du phénomène de la fabrique urbaine. Néanmoins lors

de la conception de cartes diachroniques, plusieurs questions se posent. Le passage d'une base de données spatio-temporelle à une légende de travail cohérente et explicite implique une réflexion sur les informations à sélectionner et la façon la plus pertinente de les organiser et de les expliciter dans la légende. Sur ce point, on constate que les connaissances et savoir-faire mobilisés pour la conception de cartes diachroniques correctes restent peu formalisés, et sont rarement intégrés aux outils de conception cartographiques. La conception de représentations efficaces des composantes du tissu urbain, et des relations verticales et horizontales entre ces composantes, dans l'objectif de diffuser et de valoriser les résultats d'analyses sur les évolutions morphologiques urbaines, reste un problème complexe de représentation. L'objectif du stage a été de traduire ces besoins en spécifications de carte et de déterminer les moyens graphiques et techniques pour satisfaire ces spécifications.

Méthodologie Un état de l'art a été réalisé par Cécile Remy sur les représentations statiques des dynamiques urbaines à partir de données topographiques : elle a réalisé une synthèse des moyens graphiques mobilisables pour la représentation de phénomènes évolutifs qui pourrait être re-utilisée dans d'autres travaux sur le sujet. Ce travail préalable a permis de décomposer le problème selon les deux étapes suivantes.

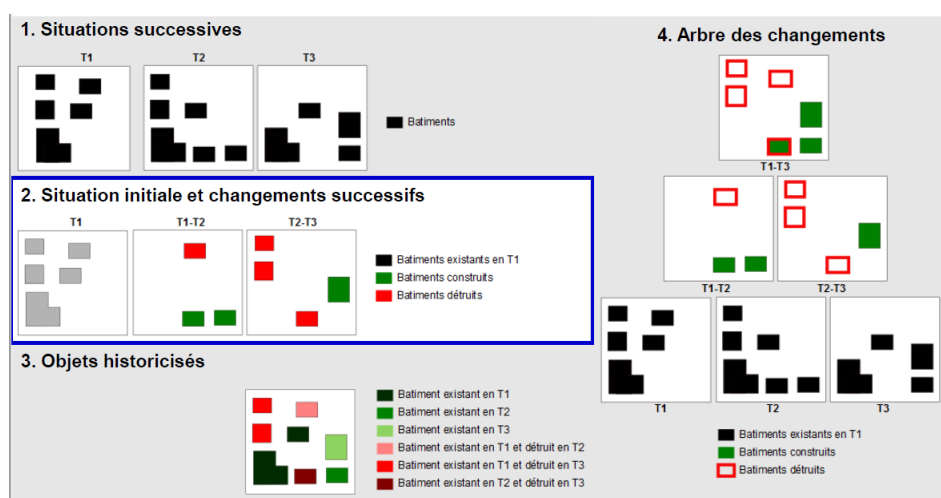


FIGURE 2.21 – 4 structures de données possibles pour une même information spatio-temporelle représentée (Remy, 2014)

De la base de données spatio-temporelles (BDST) à la base de données cartographiques : quelles sont les données que l'on va représenter ? Le premier niveau de difficulté concerne l'information à représenter. À partir d'une BDST unique, plusieurs jeux de données peuvent être extraits pour transmettre une même information. Des premiers choix doivent donc être réalisés concernant les informations à sélectionner, la méthode pour les extraire, la façon la plus cohérente de les organiser, et la façon la plus claire de les expliciter dans la légende. A ce niveau, quatre jeux de données présentant une équivalence informationnelle ont été identifiés et sont représentés dans la figure 2.21.

1. Le jeu de données « situations successives » correspond à la représentation « snapshot », ou représentation par instantanés (Cauvin et al., 2008) qui consiste à représenter une succession de couches présentant les situations à un moment donné, sans exprimer directement les phénomènes expliquant le passage d'une situation à l'autre (Langran, 1992).
2. Le jeu de données « situation initiale et changements successifs » consiste à représenter la situation initiale, puis seulement les objets ayant subi un changement depuis la date précédente.
3. Le jeu « objet historicisés » consiste à représenter de façon composite plusieurs versions successives d'un même objet à un modèle « généralisé » et réduit à une couche unique (Langran, 1992). Les dates d'apparition, de destruction, et autres changements potentiels sont renseignées en attribut de chaque objet, dorénavant doté d'une géométrie unique.
4. Le jeu de type « arbre de changement » (Sukhoveeva, 2009) consiste à représenter l'ensemble des situations et tous les des changements sont explicités (conciliation entre les cas 1 et 2).

De la base de données cartographiques à la carte : quels sont les choix de représentation graphique de ces données ? Une fois le jeu de données sélectionné et chaque ligne de légende clairement explicitée, la définition de symboles à même de traduire les évolutions observées sur un support fixe et bidimensionnel a été analysée par le biais d'un état de l'art sur la représentation du temps. Quatre grands types de procédés ont été identifiés pour traduire graphiquement la dimension temporelle sur un support fixe et bidimensionnel, et sont représentés dans la page suivante où 3 séries de bâtiments à 3 dates différentes sont représentées selon les procédés suivants : le mode de présentation (Cf. 2.22), la symbolisation des objets cartographiques (Cf. 2.23), l'étiquetage d'objets avec des textes, des pictogrammes ou des diagrammes (Cf. 2.24), et la gestion de l'intervisibilité des symboles en superposition (Cf. 2.25). L'identification de ces procédés est cependant insuffisante sans connaissances guidant leur utilisation.

A la suite de ce travail d'analyse préalable, le problème a été restreint à un jeu de données structuré en mode "situation initiale et changements successifs" (cas 2 de la figure 2.21) ; les changements représentés seront du type : apparitions, disparitions, changements morphologiques et substitutions. L'échelle de représentation sera le 1/2000è. Concernant la représentation graphique, le mode de représentation choisi est la superposition, la gestion de l'intervisibilité se fera par la gestion de l'ordre d'affichage des couches et par la gestion de symboles inter-visibles. Cécile Remy a ensuite récapitulé un ensemble de spécifications nécessaires pour piloter le processus de conception : ces spécifications sont représentées dans les figures suivantes, elles sont détaillées dans le mémoire : des spécifications de préservation (Figure 2.26), des spécifications de lisibilité (Figure 2.27) et des spécifications de compréhensibilité (Figure 2.28).

Représentation de 3 séries de bâtiments à 3 dates différentes (Remy, 2014) :

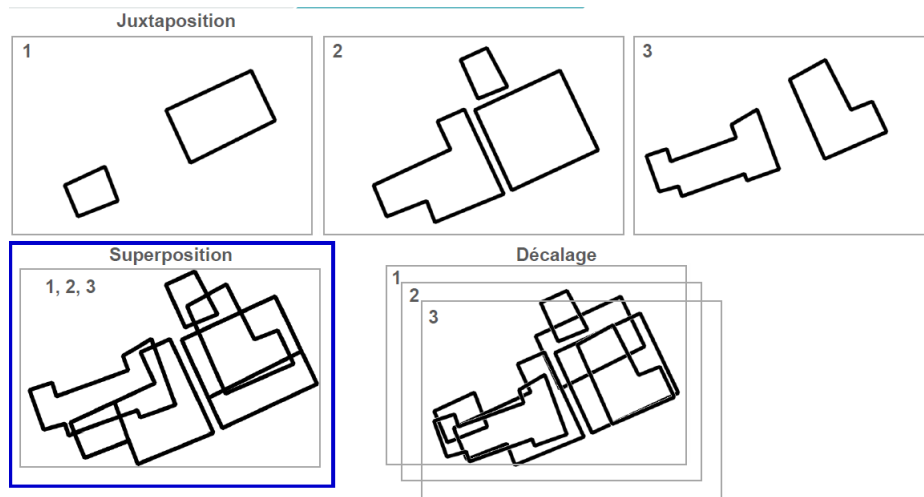


FIGURE 2.22 – Modes de représentation possibles

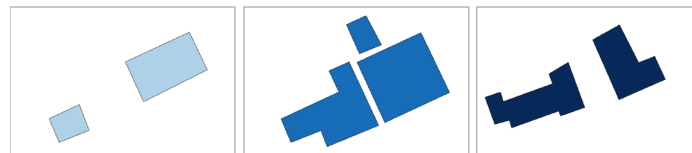


FIGURE 2.23 – Symbolisation des objets cartographiques

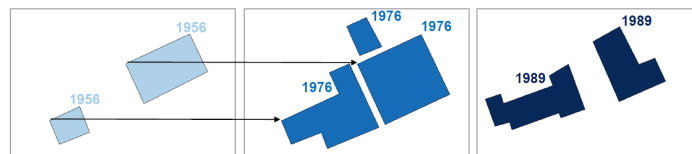


FIGURE 2.24 – Etiquettage des objets cartographiques et liens de filiation

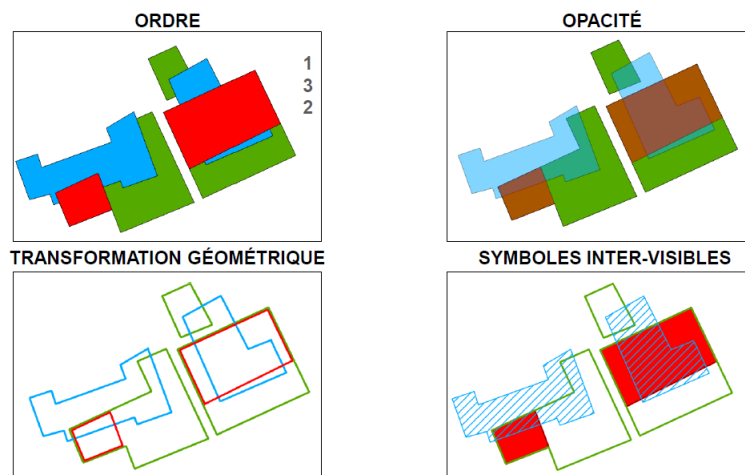


FIGURE 2.25 – Gestion de l'intervisibilité des symboles en superposition

	OBJETS GÉO.	OBJETS CARTO. Symbolisation 1	OBJETS CARTO. Symbolisation 2
CONTRAINTES D'EXHAUSTIVITÉ			
MAINTIEN DES RELATIONS TOPOLOGIQUES INTER-OBJETS			
MAINTIEN DE LA MORPHOLOGIE DES OBJETS			

FIGURE 2.26 – Spécifications de préservation (Remy, 2014)

CONTRAINTES DE PERCEPTIBILITÉ	Épaisseur minimale des linéaires
CONTRAINTES DE SÉPARATION	Espacement minimal inter-objets
CONTRAINTES DE DIFFÉRENCIATION	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: left;"> <p>Différenciation des épaisseurs</p> <p>X_1</p> <p>$X_2 = X_1 + (2^2 - 1)$</p> <p>$X_3 = X_1 + (2^3 - 1)$</p> </div> <div style="text-align: left;"> <p>Différenciation des couleurs</p> <p>Teintes</p> <p>Valeurs</p> </div> </div>

FIGURE 2.27 – Spécifications de lisibilité (Remy, 2014)

TRADUCTION COLORIMÉTRIQUE DES RELATIONS ENTRE LIGNES DE LÉGENDE	<p>Différenciation</p> <p>THEME 1</p> <ul style="list-style-type: none"> Ligne de légende 1 Ligne de légende 2 <p>Association</p> <p>THEME 2</p> <ul style="list-style-type: none"> Ligne de légende 3 Ligne de légende 4 Ligne de légende 5 <p>Ordre</p>
TRADUCTION GÉOMÉTRIQUE DES RELATIONS ENTRE LIGNES DE LÉGENDE	<p>Différenciation</p> <p>THEME 1</p> <ul style="list-style-type: none"> Ligne de légende 1 Ligne de légende 2 <p>Association</p> <p>THEME 2</p> <ul style="list-style-type: none"> Ligne de légende 3 Ligne de légende 4 <p>Association</p>
TRADUCTION DE LA CHRONOLOGIE PAR L'ORDRE D'AFFICHAGE	<p>Ordres d'affichage possibles</p> <ul style="list-style-type: none"> {0} Situation initiale {1, 2, 3} Changements intervenus entre S1 et T2 {4, 5, 6} Changements intervenus entre T2 et T3 {7, 8, 9} Changements intervenus entre T3 et T4

FIGURE 2.28 – Spécifications de compréhension (Remy, 2014)

Un problème d'optimisation sous contraintes

Légende Pour notre jeu de données « situation initiale et changements successifs », deux types de regroupements équivalents présentés en figure 2.29 sont envisageables : un regroupement des lignes selon leur période temporelle (légende 1), ou un regroupement des lignes par type de changement (légende 2). La légende 2 est celle qui a été retenue comme légende de travail. Les lignes de légende sont associées selon la nature des données représentées : la ligne "bâtiments existants en T0" est ainsi isolée, et les neuf autres lignes sont regroupées par thèmes selon le type de changement. Au sein de chaque thème, les lignes de légendes sont donc liées par des relations de type "association". La chronologie de l'information à représenter a été conçue comme une information ordonnée : au sein de chaque thème, les lignes de légende sont donc liées par des relations de type "ordre". On fait l'hypothèse que tous les types de changements seront représentés sur chaque période, ce qui ne sera pas nécessairement le cas dans les jeux de données test.

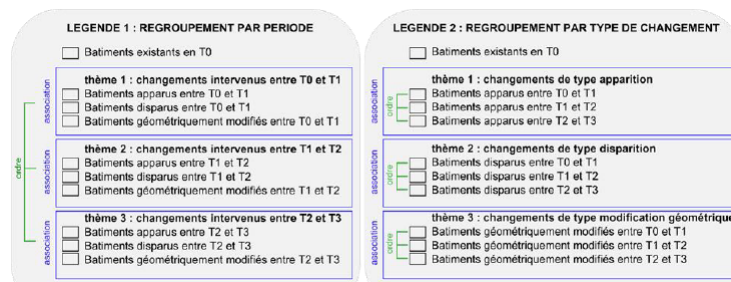


FIGURE 2.29 – Deux légendes de travail possibles (Remy, 2014)

Modélisation du problème Le problème de représentation à résoudre vise à affecter à chacune des lignes de légendes, un ordre d'affichage et une symbolisation garantissant la lisibilité et la visibilité des symboles en particulier dans les zones de recouvrement, appelées *agrégats cartographiques*. La gestion des conflits dans les agrégats cartographiques a été ramenée à un problème d'optimisation sous contraintes : l'optimisation sous contraintes consiste à déterminer parmi les solutions possibles le (ou les) meilleur(s) élément(s) par rapport à un ou plusieurs critère(s) donné(s). Notre travail vise à fournir une description pertinente et implémentable d'un problème initialement mal-défini.

Un problème de satisfaction de contraintes classique se définit par un triplet (X, D, C) , où X est l'ensemble de variables du problème, D un ensemble de domaines de définition, et C un ensemble de contraintes. Ce triplet permet de définir l'espace de recherche, qui désigne l'ensemble A des solutions consistantes. L'espace de recherche représenté par la figure 2.30 a été défini par :

- l'ensemble des variables : type de symbole (couleurs, contours pleins, contours tiretés, 4 types de hachures), ordre des couches, épaisseur des traits ;
- les contraintes à satisfaire : recouvrement du symbole < 0.9 et une position différente par couche ;
- le critère à minimiser : la somme des recouvrements individuels.

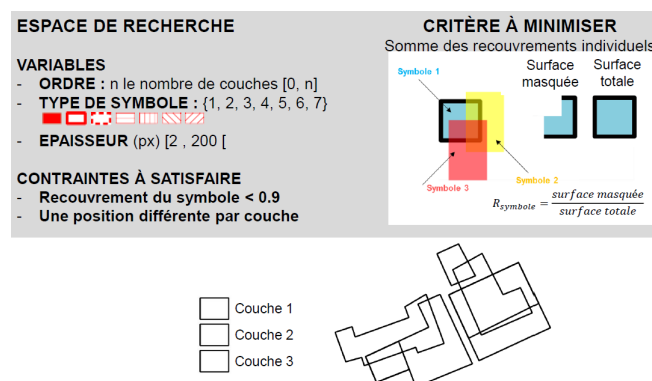


FIGURE 2.30 – Description du problème d'optimisation sous contraintes (Remy, 2014)

La fonction de coût formalisée et testée est définie comme étant celle qui maximise la somme des surfaces visibles des symboles. Bessadok and Dominguès (2011) proposaient le calcul d'un indice de recouvrement à partir de la surface d'intersection entre les couches d'objets géographiques. Cécile Remy a proposé de calculer la visibilité des symboles à partir du rapport entre la surface visible (surface totale - surface d'intersection entre la géométrie de l'objet symbolisé et celles de tous les autres objets) et la surface totale de chaque objet symbolisé sur la carte (Cf. Figure 2.30). Un prédicat peut être ajouté si l'on veut garantir qu'aucun objet ne soit masqué entièrement. Elle s'exprime donc entre 0 (masquage total) et 1 (visibilité totale).

Implémentation et méthode de résolution retenue La résolution manuelle d'un tel problème est souvent fastidieuse et chronophage. Afin de parcourir un espace de recherche extrêmement vaste, en testant un volume important de paramètres, un outil semi-automatique permettrait de proposer des solutions originales, car libérées des présupposés et parti pris conscients ou inconscients du cartographe. Un prototype a été implémenté par Julien Perret, à partir d'un algorithme d'optimisation de type mcmc (Brédif and Tournaire, 2012). La méthode de résolution retenue est un recuit simulé : une solution initiale est tirée aléatoirement et correspond à une énergie initiale calculée en fonction des critères à optimiser. Un paramètre de température est introduit. Partant de cette solution initiale, à chaque itération, le système obtient une nouvelle solution en se déplaçant dans l'espace de recherche, entraînant ainsi une modification de l'énergie du système. Si cette nouvelle solution améliore les critères à optimiser, l'énergie du système baisse. Il est néanmoins possible d'accepter des solutions dégradant les critères à optimiser (moins bonnes que les solutions précédentes) pour chercher à explorer une plus grande partie de l'espace de recherche au lieu de s'enfermer dans des optimums locaux. Ce procédé est ensuite répété jusqu'à ce que la température ait atteint un seuil déterminé en amont, ou lorsque le système stagne. En parcourant l'espace de recherche restreint, l'objectif du solveur est donc d'affecter à chacune des lignes de légende un symbole (géométrie de symbole, épaisseur) et un ordre d'affichage de façon à i) traduire de façon compréhensible les relations entre lignes et entre thèmes, ii) tout en garantissant la visibilité et la lisibilité de l'ensemble des symboles représentés sur la carte. Le prototype développé a permis de tester, ajuster, et valider les contraintes formulées.

Résultats et évaluation Le jeu de données utilisé pour le test est un jeu extrait de la base de données GeOpenSim¹³, retenu pour sa complexité et la diversité de changements qu'il présente : ce jeu de données présente plusieurs problèmes de recouvrement et identifiés en quatre agrégats cartographiques posant des problèmes de lisibilité et de compréhensibilité (entourés en rouge à gauche, et catégorisés en 4 à droite, dans la figure 2.31). La carte présentée dans la figure 2.31 est un exemple de représentation réalisée manuellement sur ce jeu de données et jugée correcte au vu des contraintes énoncées (appelée *carte experte* ensuite).

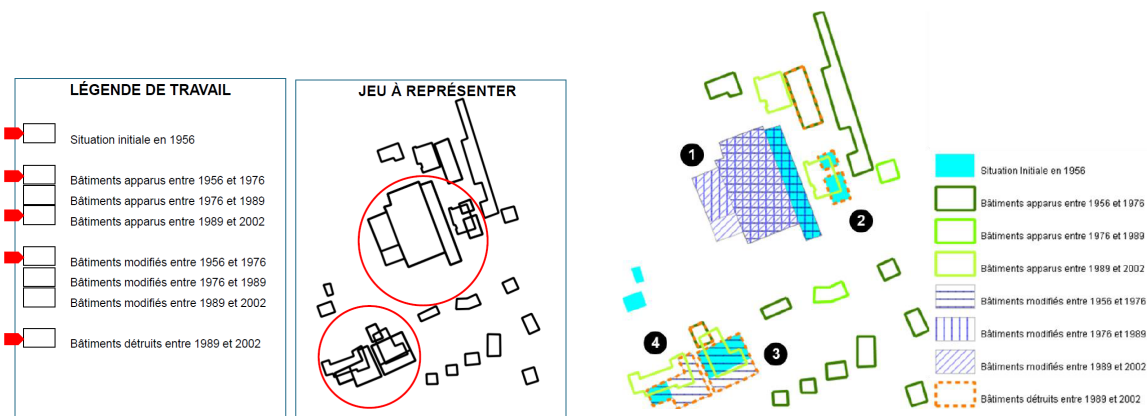


FIGURE 2.31 – Structure du jeu de données et de la légende à représenter (à gauche) ; carte experte et mise en évidence des 4 agrégats cartographiques à résoudre (à droite). (Remy, 2014)

La figure 2.32 présente deux solutions, pour une optimisation où l'ensemble des **variables..varient**, avec le score le plus faible et le score le plus fort : l'abondance des hachures dans différentes orientations et des épaisseurs variées ne permettent effectivement pas une bonne lecture de l'organisation de la légende.

13. <http://geopensim.ign.fr/>

L'association des lignes de légende par thème n'est pas évidente et perturbe la lecture. Les contours épais deviennent saillants et mettent donc l'accent sur certaines informations.

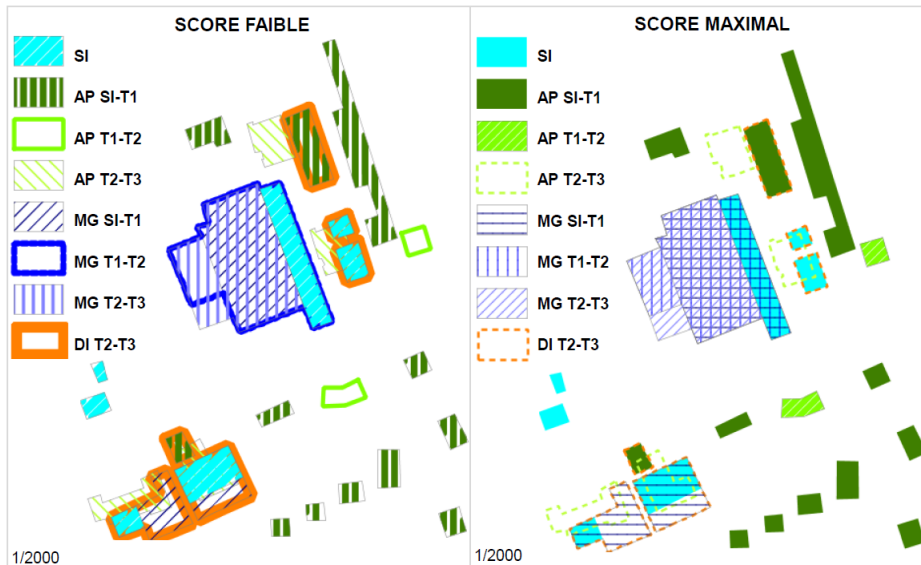


FIGURE 2.32 – Cartes optimisées : score faible et score maximal (Remy, 2014)

La carte optimisée proposée par le solveur à partir du seul critère de recouvrement est déjà proche de la solution optimale (Cf. comparaison dans la figure 2.33). La minimisation du recouvrement se fait de deux façons : d'une part, la plupart des symboles sont discontinus (trames et contours pointillés) par définition les moins couvrants, d'autre part l'épaisseur des linéaires est abaissée au seuil minimal.

Cependant, deux éléments peuvent limiter l'efficacité de cette carte : la sur-représentation des symboles discontinus (trames et tirets), même s'ils minimisent le recouvrement, fatigue l'œil d'autant plus qu'elle est associée à des changements d'orientation. L'ordre qui maximise le recouvrement peut donner lieu à des difficultés d'interprétation de la séquence des changements pour certains agrégats (exemple : agrégat 3 : il est difficile d'évaluer rapidement l'enchaînement des apparitions et destructions de bâtiments).

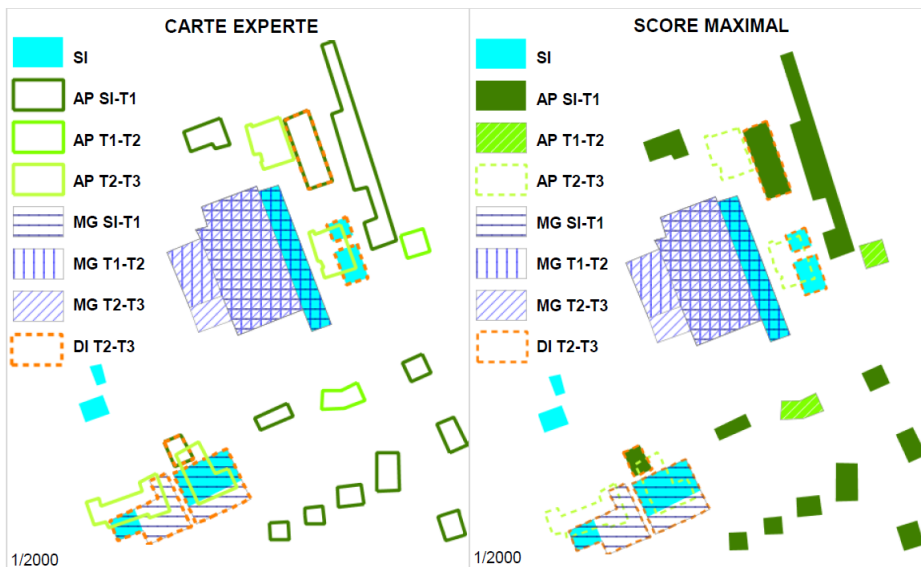


FIGURE 2.33 – Carte experte et carte optimisée avec score maximal (Remy, 2014)

Si on ne choisit de faire varier que l'épaisseur (ordre et géométrie sont fixés), cela réduit les possibilités du solveur pour optimiser le recouvrement : la solution optimisée ressemble à la solution optimale précédente, mais elle maximise le contraste d'épaisseur entre les contours superposés (Cf. 2.34). Cette symbolisation améliore incontestablement la visibilité des séquences apparition-destruction sur un même

objet. Le repérage des symboles est par ailleurs facilité par leur différence d'épaisseurs. La compréhension des séquences dans les agrégats est facilitée par le respect de l'ordre. Les contours les plus épais sont cependant extrêmement saillants et attirent l'attention au détriment des autres. Cette solution présente par ailleurs l'avantage de ne comporter aucune superposition de trames et de contours pointillés.

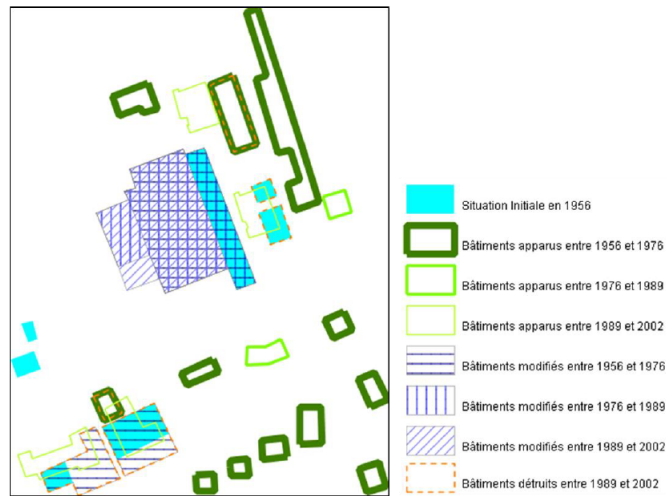


FIGURE 2.34 – Description du problème d'optimisation sous contraintes (Remy, 2014)

Conclusion Cette première analyse des résultats générés pour minimiser le recouvrement à partir de trois variables est encourageante, puisque l'ensemble des rendus générés permettent d'identifier un à un l'ensemble des symboles représentés dans la carte, ce qui constitue déjà une amélioration notable. L'affectation des ordres d'affichage et des symboles en fonction du seul critère de recouvrement nuit cependant à la compréhensibilité d'ensemble de la carte. L'affectation des types de symboles se fait de façon à maximiser la différence entre les symboles superposés, ce qui vient compliquer le processus de catégorisation notamment entre les symboles d'un même thème. L'affectation des ordres d'affichage sur la base de la symbolisation des objets cartographiques mais aussi de leur emprise conduit le système à proposer des ordres d'affichage parfois contre-intuitifs. Ces constats semblent confirmer l'hypothèse d'un nécessaire compromis entre des contraintes de lisibilité et d'exhaustivité à satisfaire d'une part, et des critères de recouvrement et de compréhensibilité à optimiser d'autre part. Ces premières hypothèses sont cependant à prendre avec précaution : les résultats analysés plus haut sont extrêmement sensibles au paramétrage des styles utilisés (épaisseur et espacement) fixé empiriquement dans le cadre de ce test.

2.5 Évaluation : émotion ressentie par les utilisateurs

Cette section résume le travail réalisé en collaboration avec Sara Fabrikant (Université de Zürich - GIVA), Georgios Papastefanou (Leibniz-Institute for the Social Science - GESIS) et Sara Maggi (Université de Zürich - GIVA) dans les papiers (Fabrikant et al., 2012, 2013).

Problématique Comment le rendu cartographique et l'émotion humaine (i.e. la réponse esthétique) interagissent avec la perception et la cognition pendant une inférence spatio-temporelle à partir d'une géovisualisation? Comme on ne connaît pas le lien entre géovisualisation et émotion(s) (par exemple, joie, surprise, peur, etc.), nous avons décidé d'inclure dans notre recherche la mesure et le contrôle d'une activité émotionnelle lors de la visualisation d'une représentation graphique. Les émotions impliquent des modifications physiologiques, comme une sécrétion accrue de la sueur, par des pics distincts de l'activité sudomotrice, qui suit l'excitation du système nerveux sympathique. Afin de mesurer cette excitation, on peut donc mesurer les modifications concomitantes de la conductivité de la peau (Boucsein, 1992). Ce travail se positionne dans la suite des travaux scientifiques en perception de l'esthétique en psychologie (Berlyne, 1974), et plus récemment en neurosciences cognitives (Chatterjee, 2010). Ce type d'approche n'a pas encore été réalisé en cartographie ni dans les domaines connexes où il est question de géovisualisations. Nous proposons ainsi un cadre méthodologique générique pour l'analyse systématique

des réponses émotionnelles humaines à des visualisations, et appliquons ce cadre spécifiquement à la réaction psycho-physiologique d'humains à l'utilisation de palettes de couleurs inhabituelles dans des cartes topographiques. On sait que les couleurs sont associées affectivement à des situations et des objets, de façon positive ou de façon négative (Palmer and Schloss, 2010), et qu'il y a également des différences culturelles dans les préférences de couleurs (Palmer, 1992). Notre question de recherche est la suivante : comment les choix de couleurs dans les géovisualisations interagissent avec l'émotion et l'affect humains (réponse esthétique) ? La perception est un mécanisme de réaction à un stimulus, incluant la saillance visuelle (*bottom-up*), l'émotion qui peut être négative ou positive fonctionne par pics émotionnels (*bottom-up/top down*) et la cognition fait référence à de la connaissance antérieure et à l'apprentissage (*top-down*).

Méthodologie Nous avons conçu une expérimentation pour tester notre approche, consistant à mesurer les réponses émotionnelles face à un ensemble de cartes topographiques, utilisant par des palettes de couleurs différentes, provenant de cartes "à la manière de" produites pendant ma thèse (Christophe, 2011). La figure 2.35 montre les cartes stimuli proposées pendant l'expérimentation : les couleurs de peintures de Derain, Matisse (Figure 1L), et van Gogh (Figure 1F, 1H, 1J), ont été appliquées sur un même espace géographique (Christophe, 2009a). Nous avons aussi rajouté deux cartes topographiques avec deux palettes de couleurs traditionnelles utilisées dans la production de cartes topographiques en série en Europe, i.e. IGN France (Figure 1K) et Swisstopo (Figure 1D).

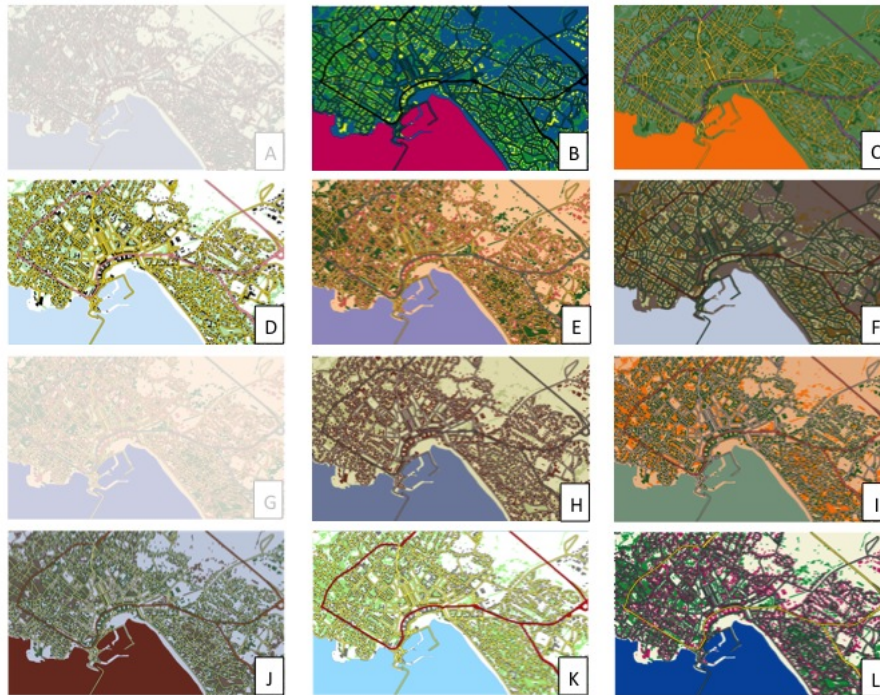


FIGURE 2.35 – Cartes utilisées lors de l'expérimentation (Christophe, 2009a; Fabrikant et al., 2012)

Les participants (N=4) ont été recrutés à l'Université de Zürich (F=2, M=2) : nous leur avons demandé d'imaginer être dans une galerie d'art en ligne, et nous leur avons expliqué qu'ils verraient une série de cartes du même espace géographique. Nous leur avons demandé de regarder les cartes, comme si ils étaient dans une exposition artistique. Les cartes ont été affichées sur l'écran à une résolution spatiale de 1200*1600 pixels : les cartes étaient affichées toutes les 10 secondes, avec une pause de 8 secondes entre chaque (montrant un carré gris avec une croix noir au milieu). Voici les différentes données acquises pendant l'expérimentation :

- données psycho-physiologiques : conductance de la peau (niveau de conductance général et les amplitudes des variations de la conductance dans le temps), pouls, température du corps, etc., à l'aide d'un capteur au niveau du poignet gauche qui capte ces réactions psycho-physiologiques tout au long de l'expérimentation (Papastefanou, 2009).

- suivi du regard : enregistrement automatique des fixations et saccades lorsque les participants regardent les cartes en mode "passif" (exposition de cartes).
- questionnaire : les participants doivent ordonner les cartes par préférence, et donner des informations sur leur background.
- entretien post-expérimentation : questions ouvertes aux participants afin de recueillir leurs feedbacks (type échelle de Likert) : par exemple, si ils pensent que les couleurs étaient attractives ou harmonieuses, et si ils utiliseraient ces cartes topographiques avec les palettes de couleurs proposées.

Résultats Bien que nous n'ayons collecté des données que pour 4 participants, afin de tester la robustesse des méthodes que nous avons employées, nous obtenons quelques résultats prometteurs sur l'acquisition systématique des effets esthétiques sur l'émotion humaine, en combinant des données issues de différentes méthodes d'acquisition. Tout d'abord, nous présentons les classements des préférences de cartes, suivi de leurs réactions émotionnelles (Figure 2.35). Nous avons exclu la carte la plus traditionnelle (Figure 2.35-A) et la carte (Figure 2.35-G) du classement des préférences (grisées sur la figure 2.35), car elles étaient trop similaires à d'autres cartes de notre sélection. Nous remarquons que les deux cartes topographiques traditionnelles ont été classées la deuxième plus attractive (Figure 2.35-K) et la moins attractive (Figure 2.35-D). La carte utilisant la palette de Matisse, avec des règles traditionnelles d'utilisation de la couleur (2.35-L) a été considérée comme la plus attractive. Le haut de la figure 2.36 montre l'agrégation des résultats, pour chaque carte, de la plus attractive à la moins attractive.

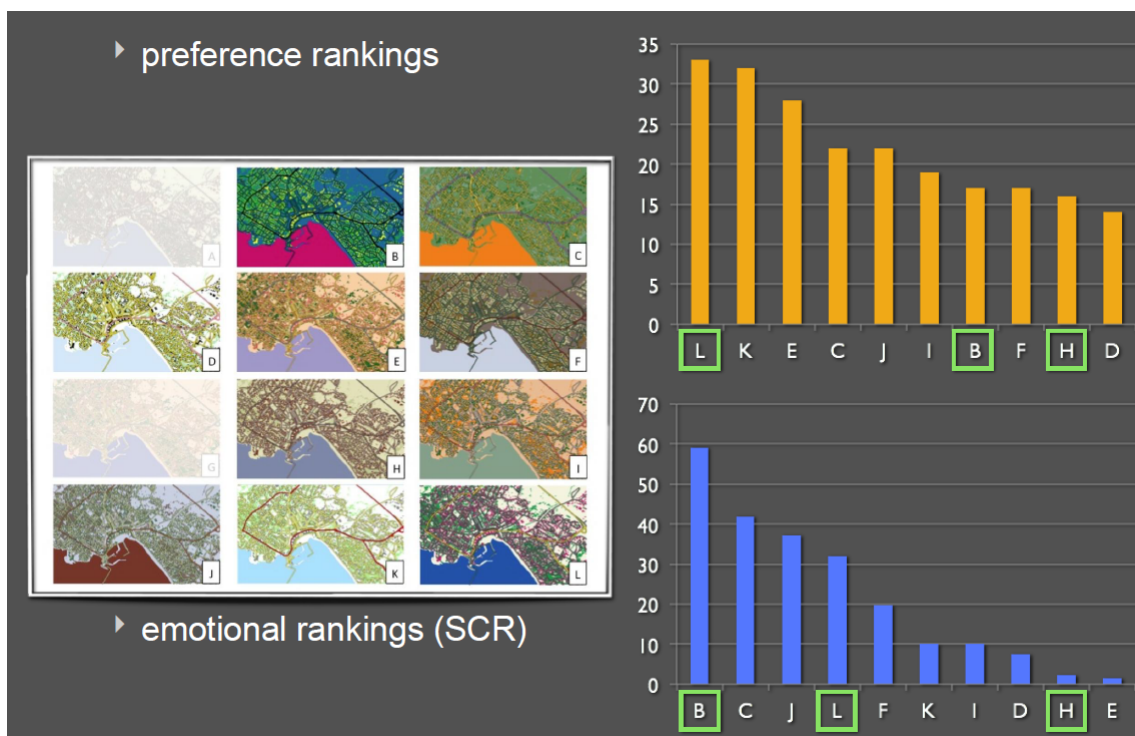


FIGURE 2.36 – Classement des préférences des participants, de la plus attractive à la moins attractive (en haut) ; classement des réponses émotionnelles, de la plus forte à la moins forte (en bas) (Fabrikant et al., 2012)

Les trois premières cartes montrent toutes des affectations de couleurs traditionnelles, i.e. des bleus pour la mer, des verts pour la végétation, un fond pâle, même si les couleurs elle-mêmes peuvent être inhabituelles dans les cartes topographiques. Cette préférence manifeste est à mettre en confrontation avec les résultats sur les réponses émotionnelles, présentées dans le bas de la figure 2.36 montrant l'agrégation de la modification totale de la conductance de la peau pour toute la période d'observation de la carte, pour tous les sujets et pondérée par sujet¹⁴.

Un "classement émotionnel" apparaît, avec les cartes (B) (la carte avec la palette de Matisse et les règles de composition artistiques), (C) (la carte avec la palette de Derain et les règles de composition

14. Un pré-traitement sur les données acquises est nécessaire afin de pouvoir comparer les réponses entre les sujets testés.

artistiques) et (J) (la carte avec la palette de van Gogh et les règles de composition artistique) comme les trois générant le plus de réponses émotionnelles. Des analyses supplémentaires nous permettraient de distinguer dans les réponses émotionnelles, la valence positive ou négative, tout particulièrement quand on peut croiser les résultats avec un classement explicite des préférences ou en collectant d'autres réponses humaines. La signature émotionnelle pour les cartes (B), (C) et (J) suggère plutôt une tendance pour une émotion négative. Ces cartes très contrastées utilisent des palettes de couleurs originales, avec des règles de composition originales (les relations conventionnelles ne sont plus respectées) : la mer est respectivement en rose, orange et bordeaux. La carte Matisse rose-bleue (B) est mentionnée dans les entretiens post-expérimentation comme "*shocking*", "*strange*" ou "*a glowing in the dark/night-vision*". De façon intéressante, ces cartes provoquant une émotion négative, apparaissent en bonne position dans le classement des préférences. La plus attractive (L) déclenche la plus forte réponse émotionnelle des cartes, avec utilisation conventionnelle des couleurs Matisse, et suggère aussi une réponse émotionnelle positive. Au contraire du classement des préférences, les plus conventionnelles, peu contrastées et ternes (D), (H), et (E), ne semblent pas générer de réponse émotionnelle particulière. À cause de la taille et de l'hétérogénéité du groupe de participants, une agrégation des réponses émotionnelles individuelles n'est pas vraiment pertinente. Il y a de fortes différences entre les réponses individuelles, en fonction de l'âge et du sexe.

Néanmoins, de façon remarquable, la carte (L) (carte Matisse avec application conventionnelle) se situe dans les trois premières cartes pour trois sujets sur 4, et la carte (B) (carte Matisse avec application artistique) est dans les trois premières cartes pour 2 sujets sur 4.

Le cadre méthodologique expérimenté dans ce travail de recherche pourrait être utilisé pour étudier d'autres critères esthétiques dans la conception de cartes, comme la saillance, l'équilibre, la complexité, l'harmonie, etc. Ainsi, nous espérons fournir une approche générique pour désambiguïser perception et cognition, des aspects émotionnels et affectifs dans les interactions représentations-utilisateurs, tout particulièrement quand on cherche à évaluer les qualités esthétiques de représentations utilisées pour de l'inférence spatio-temporelle.

2.6 Aide au paramétrage des couleurs par du dialogue homme-machine

Par rapport aux travaux présentés précédemment, il s'agit maintenant de considérer comment l'utilisateur peut contrôler les différentes étapes décrites en amont (extraction, caractérisation et optimisation) dans une approche plus globale. L'aide au paramétrage des couleurs, via du dialogue homme-machine, pendant le processus de conception cartographique, est l'objet de ma thèse de doctorat.

Afin d'intégrer au mieux l'utilisateur dans sa démarche de conception, nous avons tout d'abord proposé une méthode de conception coopérative pour le choix des couleurs dans la légende, à partir d'interactions homme-machine (2.6.1). Afin d'adapter au mieux cette méthode de conception à l'utilisateur, nous avons proposé un modèle de dialogue entre l'utilisateur et le système (2.6.2). L'ensemble du système proposé a ensuite été évalué (2.6.3). L'objectif de cette approche est de mieux prendre en compte la diversité des utilisateurs et de leurs pratiques, quel que soit leur profil, afin de les aider dans leur démarche en les guidant vers des propositions de solution et en favorisant leur créativité.

La méthode coopérative a été détaillée dans (Christophe, 2007a, 2008c,a; Christophe et al., 2010b; Balley et al., 2014). Le modèle de dialogue a été présenté dans (Christophe, 2007b; Christophe et al., 2007; Christophe, 2008b, 2009a; Christophe and Ruas, 2009; Christophe and Bucher, 2009). La méthode coopérative, le modèle de dialogue et le test utilisateur sur l'utilisabilité de l'application d'aide aux choix des couleurs ont été détaillés dans mon mémoire de thèse (Christophe, 2009a).

2.6.1 Méthode de conception coopérative

Nous avons proposé une méthode de conception coopérative permettant d'aider l'utilisateur à choisir des couleurs selon deux stratégies différentes : un mode échantillons cartographiques et un mode palettes de couleurs. Nous verrons que même si les deux stratégies conservent une démarche générale commune, présentée dans la figure 2.37, elles diffèrent à deux étapes qui ont nécessité des interactions spécifiques avec l'utilisateur (mode échantillons) ou un traitement des contraintes spécifiques (mode palettes) : le

mode échantillons nécessite une phase d'acquisition des préférences (phase 2) plus élaborée (exploration d'une base d'échantillons cartographiques) (Cf. Figure 2.38), alors que le mode palettes nécessite une phase d'interprétation des préférences (phase 3) plus élaborée (interprétation des choix de couleurs en fonction de contraintes cartographiques ou artistiques) (Cf. Figure 2.39).

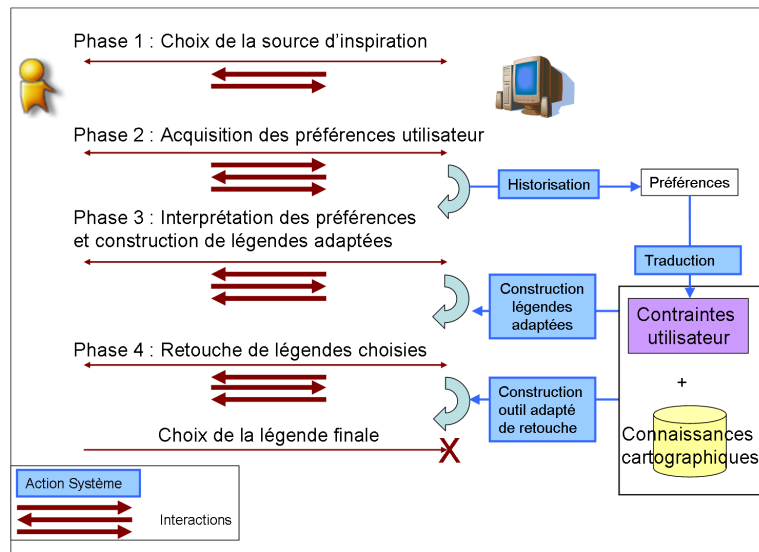


FIGURE 2.37 – Méthode coopérative de conception de légende (Christophe, 2009a)

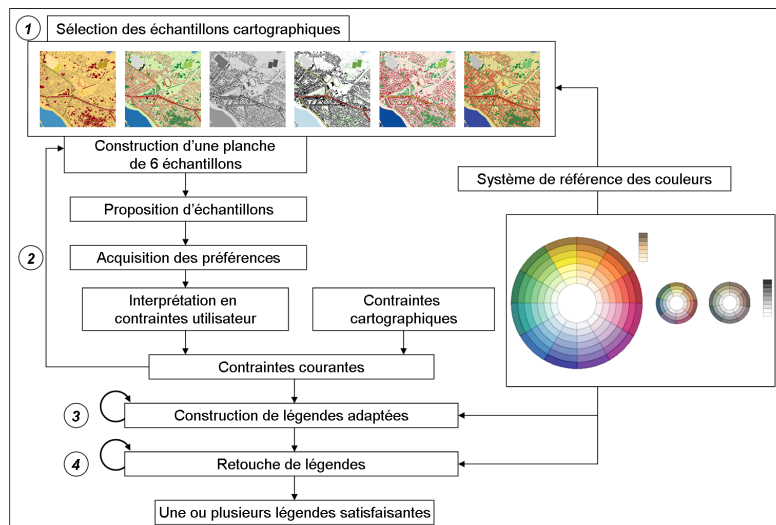


FIGURE 2.38 – Synthèse de la stratégie à base d'échantillons (Christophe, 2009a)

1. **Choix d'une source d'inspiration par l'utilisateur** : la machine propose à l'utilisateur de travailler avec un type de source d'inspiration : soit les échantillons cartographiques (*mode échantillons*), soit les toiles de maîtres (*mode palettes*). L'utilisateur choisit un type de source d'inspiration. La machine enregistre ce souhait et déclenche la conception en *mode échantillons* ou en *mode palettes*.
2. **Acquisition des préférences de l'utilisateur sur le type de source d'inspiration** : il s'agit d'acquies les préférences de l'utilisateur sur les couleurs qu'il souhaiterait utiliser pour remplir sa légende en cours de construction. Ces préférences sont appelées *initiales*, car il se peut qu'elles évoluent ou changent au cours de la conception. De nouvelles préférences sont susceptibles d'apparaître au cours du processus, remettant éventuellement en cause les préférences initiales.

Stratégie Échantillons : l'utilisateur formule des préférences, sur la source "J'aime/Je n'aime pas cet échantillon", ou sur une couleur "J'aime/Je n'aime pas cette couleur pour le thème A".

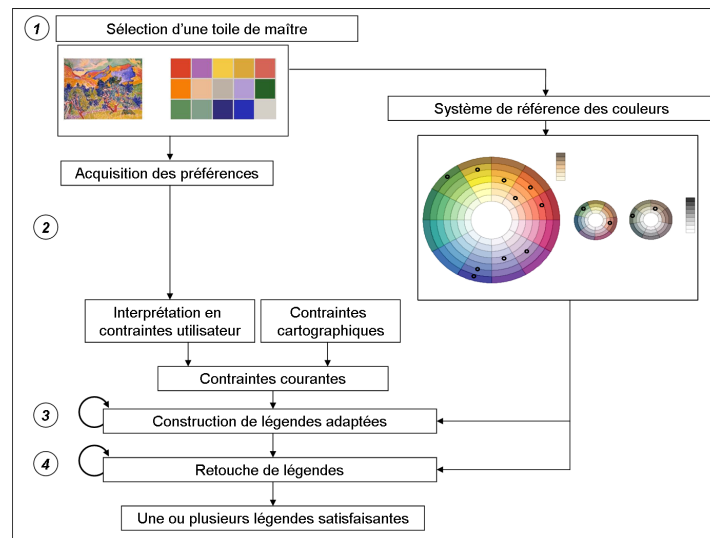


FIGURE 2.39 – Synthèse de la stratégie à base de palettes de peintres (Christophe, 2009a)

Ce dernier type de préférence sera interprété comme contraintes utilisateur dans l'étape suivante. Les préférences sur la source servent de **filtres sur la base des échantillons** pour construire des propositions futures d'échantillons. Si un utilisateur déclare "*J'aime cet échantillon*", cela marque l'échantillon comme approuvé, comme tout ceux qui ont la même couleur pour le thème concerné. Si une couleur est désapprouvée dans un échantillon, tout l'échantillon et également désapprouvé. Un degré de **priorité** est donné aux échantillons approuvés, selon que l'approbation a été mise sur l'échantillon-même ou sur une de ses couleurs. La difficulté réside dans la nécessité d'une approche en deux temps : faire explorer largement la base d'échantillons à l'utilisateur, puis converger vers des solutions satisfaisantes. Le système a été développé à l'aide des notions de filtre et de priorité, les approches par catégorisation d'échantillons, par exemple, échantillons les plus proches ou les plus représentatifs auraient été plus adaptées : cependant l'identification de groupes perceptuellement proches et d'éléments représentatifs n'est pas résolue, malgré les travaux démarrés avec Bénédicte Bucher, Catherine Dominguès et Laurence Jolivet du COGIT. La phase est donc réitérée jusqu'à ce que l'utilisateur ait trouvé au moins un exemple de couleur à son goût pour chaque ligne de légende, et si possible plusieurs couleurs possibles pour chaque ligne de légende¹⁵.

Stratégie Palettes : l'utilisateur sélectionne une peinture et peut spécifier ses préférences de couleur sur la palette des couleurs extraite de la peinture¹⁶, du type "J'aime/Je n'aime pas cette couleur". Cette première étape est donc rapide.

3. **Interprétation des préférences et construction de légendes adaptées** : le système traduit les préférences de l'utilisateur en contraintes et spécifie des couleurs possibles à partir de l'ensemble des contraintes courantes (utilisateur, cartographiques, artistiques), pour construire des légendes variées, adaptées à ces contraintes. Cette étape a été décrite en section 2.4.1.
4. **Retouche des couleurs par l'utilisateur** : l'utilisateur sélectionne une légende, puis un thème à modifier dans cette légende. Le système construit un outil adapté de retouche adapté à ce thème. La palette proposée est construite à partir des contraintes courantes, par exemple :
 - proposer des couleurs approuvées par l'utilisateur mais non utilisées ;
 - proposer des couleurs proches, à partir des travaux sur les familles de couleurs dans le cercle chromatique et ou les travaux sur l'harmonie ;
 - proposer des couleurs contrastées avec les couleurs existantes
 - proposer des couleurs non conventionnelles en conservant le contraste de valeur ;
 - proposer l'ensemble des couleurs possibles, sans contraintes a priori.

La conception se termine par la validation d'une légende finale par l'utilisateur lui-même. Un exemple

15. A ce stade, il n'y a donc pas de possibilité de choisir une seule couleur pour un thème et de laisser le système remplir tous les autres thèmes à sa guise.

16. Il est effectivement plus difficile d'interpréter les choix de couleurs faits directement dans une peinture.

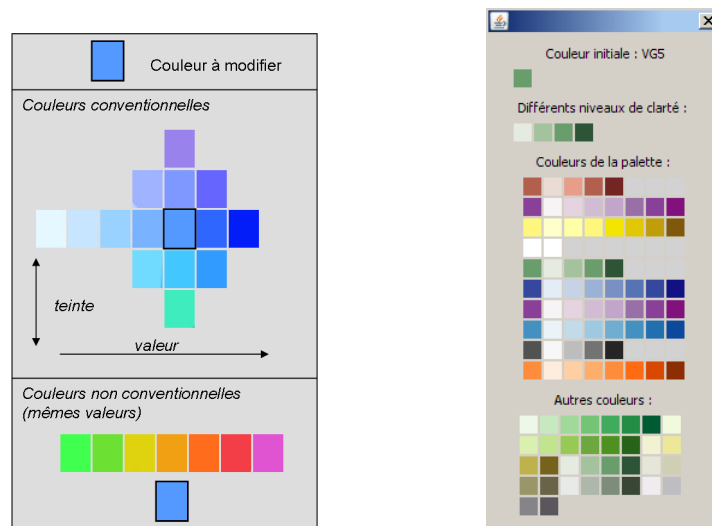


FIGURE 2.40 – Principe de l'outil de retouche (à gauche) et exemple d'implémentation pour la retouche de la végétation (à droite) (Christophe, 2009a)

détaillé sur deux planches d'échantillons et trois cartes résultantes est présenté dans les deux pages suivantes.

S'inspirer d'échantillons cartographiques La figure 2.41 présente la première planche d'échantillons proposée à l'utilisateur. La figure 2.42 présente les commentaires faits par l'utilisateur sur cette première planche.



FIGURE 2.41 – Planche 1 d'échantillons cartographiques

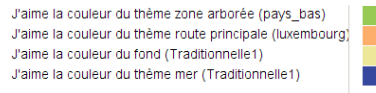


FIGURE 2.42 – Préférences sur la planche 1 d'échantillons cartographiques

L'utilisateur demande ensuite à voir une autre planche : une deuxième planche est proposée (Cf. Figure 2.43). La figure 2.44 présente les nouveaux commentaires faits par l'utilisateur.

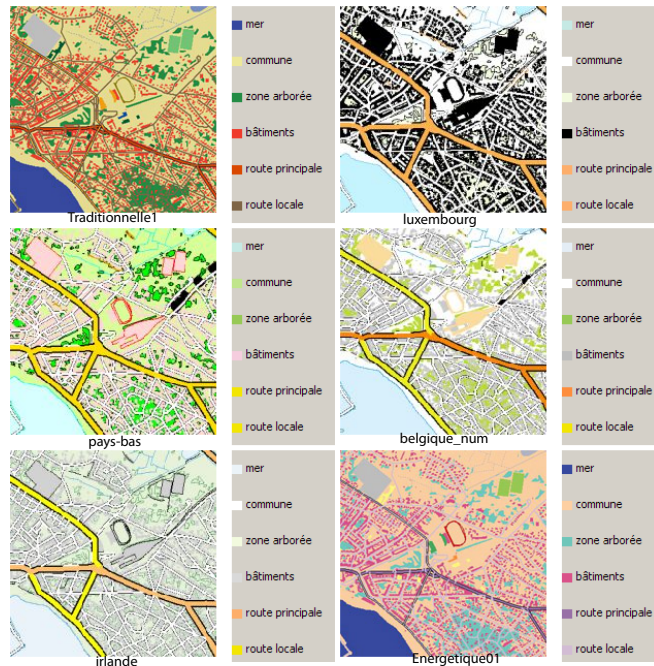


FIGURE 2.43 – Planche 2 d'échantillons cartographiques

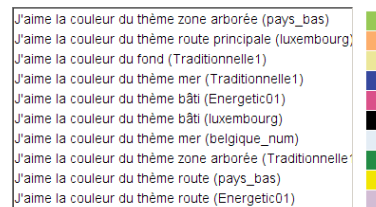


FIGURE 2.44 – Préférences sur la planche 2 d'échantillons cartographiques

L'utilisateur lance la construction des légendes. La figure 2.46 de la page suivante présente trois des cartes construites à l'aide des légendes générées automatiquement.



FIGURE 2.45 – Trois exemples de cartes résultantes

Des exemples de résultats cartographiques "à la manière des peintres" sont visibles dans les figures 2.14 et 2.15

Les interactions homme-machine permettent à l'utilisateur d'exprimer des préférences variées et le système propose des spécifications de couleurs variées, dans l'objectif de favoriser la créativité de l'utilisateur, tout au long du processus. Néanmoins, nous avons détecté des problèmes locaux (problème sur-contraint, incohérences, malentendus, impasse) durant ce processus qui demandent d'être résolus pour pouvoir proposer un modèle qui assiste réellement l'utilisateur. Pour cela, utilisateur et système ne vont pas devoir seulement interagir au travers d'une interface standard, mais communiquer au travers d'une interface permettant l'adaptation du système à l'utilisateur.

2.6.2 Modèle de dialogue homme-machine

Nous avons donc utilisé des techniques de dialogue homme-machine pour mettre en œuvre notre application d'aide à la conception de légendes. Les travaux de recherche en Dialogue Homme-Machine

(DHM) visent à utiliser des protocoles d'interaction sociale dans la communication homme-machine. Il n'est pas question de copier le dialogue homme-homme mais d'en préserver certaines caractéristiques qui semblent essentielles à une bonne communication entre les interlocuteurs : échange, écoute, compréhension, maintien du dialogue, gestion de l'attente et des silences. En particulier, le **dialogue finalisé** est orienté vers le **traitement d'une tâche**. Une **tâche** est la réalisation d'un but dans un contexte précis (Caelen, 2004a,b). Un **but** est "une situation à atteindre ou un état mental à satisfaire" (Caelen, 2003). Nous partons du principe que les deux interlocuteurs sont suffisamment motivés pour que le dialogue se déroule bien et conduise à une solution ; néanmoins cette motivation peut évoluer au cours du dialogue : incompréhension, incohérence et ennui peuvent apparaître. Les deux premiers problèmes doivent être détectés et réparés, le troisième doit être évité afin qu'un interlocuteur n'en vienne pas à renoncer.

Un **modèle de dialogue** définit les stratégies et les actes du dialogue. Dans mon mémoire de thèse, j'ai décrit différents modèles de **stratégies de dialogue**, à partir de (Caelen, 2002, 2003; Caelen and Xuereb, 2007). Même si j'ai proposé, dans un premier temps, une méthode coopérative (Cf. section précédente), il se peut que les buts du système et de l'utilisateur soient incompatibles, entre contraintes cartographiques et préférences utilisateur, amenant à des divergences d'opinions ou à des conflits éventuels : ces conflits doivent être réglés par une **stratégie de coopération / négociation** pour conserver un dialogue fluide et obtenir des solutions acceptables. Une stratégie de coopération vise à ajuster les buts des deux interlocuteurs, en recherchant une solution optimale dans un espace des possibles et en accompagnant les interlocuteurs jusqu'à la solution. Une stratégie de négociation se produit quand les buts sont incompatibles, et que les interlocuteurs veulent minimiser leurs concessions : elle vise à imposer un but ou à accepter un compromis pour l'un des interlocuteurs.

Dans notre contexte, nous cherchons à converger vers une solution satisfaisante, donc le but conversationnel doit être maintenu et la négociation doit être poussée le plus loin possible jusqu'à **atteindre un but acceptable pour les deux interlocuteurs**. L'efficacité d'une telle stratégie peut être évaluée par la vitesse de convergence des actes vers un but final ou distance au but final. On peut donc être conduit à s'éloigner provisoirement du but pour éviter des impasses ou des situations d'échec et fluidifier le dialogue. Nous utilisons les définitions de (Caelen, 2004a,b) "par convention, nous distinguons un acte, produit par l'utilisateur, et une action produite par une machine." Nous décomposons donc des **actions du système** (*Construire, Proposer, Traduire, etc.*) et des **actes de l'utilisateur** (actes de communication qui déclenchent l'exécution de fonctionnalités de gestion de l'interface et des réponses au système, et les actes de création qui entraînent la création ou la modification d'une variable du dialogue (*Légende, Contrainte*) ou d'un attribut d'une variable (exprimer une préférence, retoucher une couleur, re-organiser les thèmes, etc.). Nous nous intéressons en particulier aux actes utilisateur qui produisent des contraintes, i.e. les actes de création de type 'exprimer une préférence'.

Dans les modèles de dialogue, un objet particulier est responsable du **contrôle global du dialogue** : on parle de gestionnaire du dialogue, de dialogueur ou de contrôleur. Ses fonctionnalités vont donc être liées au maintien du dialogue, à la conception de légende et à la gestion de contraintes. La tâche de conception a un **plan de résolution** qui est la méthode de conception coopérative en quatre phases présentée dans la section précédente. Le but de la tâche de conception ainsi que son plan de résolution étant connus, l'enjeu du dialogue est d'**adapter le plan de résolution à la situation courante** : il s'agit d'évaluer la situation, pour pouvoir adapter la méthode de conception.

Les cinq tâches principales du contrôleur de dialogue

J'ai proposé les cinq tâches principales du contrôleur de dialogue suivantes, permettant de mener à bien la tâche de conception de légende :

1. **Gestion des contraintes** : pendant la phase 2 d'acquisition des préférences, l'utilisateur exprime une préférence dans l'interface qui est envoyée au contrôleur de dialogue pour interprétation. Nous avons décrit ce processus dans le paragraphe 3.4.3. Nous insistons ici sur le rôle du *Contrôleur Dialogue* dans ce processus. Nous distinguons deux étapes : de la préférence de l'utilisateur à l'acte de l'utilisateur (1), de l'acte de l'utilisateur à une contrainte utilisateur (2). Tant que l'utilisateur n'a pas choisi explicitement de lancer la phase 3 d'interprétation des préférences et de construction des légendes, les actes utilisateur sont enregistrés par le *Contrôleur Dialogue*, au fur et à mesure de leur création par l'utilisateur : ceci permet de faire diverses vérifications sur les actes courants. Par exemple, si l'utilisateur supprime une préférence dans l'interface, l'acte utilisateur correspondant à cette préférence est supprimé de l'historique des actes courants et ajouté à l'historique des actes

supprimés. À tout moment l'historique des actes courants nous donne une idée des préférences de l'utilisateur.

2. **Conception de légendes** : la conception d'une légende est la tâche principale de notre contrôleur de dialogue qui a pour plan de résolution la méthode de conception coopérative de légendes décrite précédemment. En termes d'interaction homme-machine, l'enchaînement des quatre phases a été décrit précédemment, nous voulons maintenant permettre un déroulement plus flexible de la méthode en prenant plus en compte l'utilisateur.

Chaque phase est une sous-tâche avec un sous-but à atteindre et un plan local de résolution. Les points d'intervention possibles du contrôleur se situent à chaque interaction entre l'utilisateur et la machine, ainsi qu'à la fin de chacune des quatre phases de la méthode de conception. Le contrôleur déclenche chaque phase : il surveille comment elle se déroule (**évaluation**), en vérifiant la qualité de chaque interaction et en autorisant le déclenchement des interactions suivantes prévues par le plan (**décision**). La fin d'une phase est marquée par la réussite de la sous-tâche qui est nécessaire pour déclencher la phase suivante (**décision**) ; en cas de problème le contrôleur propose des solutions (**réparation**). C'est l'utilisateur qui décide de la fin de la tâche principale en validant un choix de légende.

3. **Évaluation** : la tâche d'évaluation est importante car elle permet au moteur de dialogue de savoir quel est l'état d'avancement du processus c'est-à-dire l'état du dialogue et l'état de l'objet principal du dialogue, la légende en cours de construction. Nous parlons donc d'état à la fois comme *état d'avancement* (démarrage, en cours de, fin) et comme *état par rapport à des critères d'évaluation* (complétude, satisfaction, efficacité). Nous détaillons ces deux évaluations d'états dans la suite.

1- Évaluation du dialogue : la tâche d'évaluation du dialogue consiste à vérifier que le dialogue se déroule sans problèmes, ni ambiguïtés entre l'utilisateur et le système. Trois facteurs sont importants à étudier :

La fluidité se définit comme la « capacité de production continue et l'absence de marques de rupture du flux verbal » (Nussbaum and Unamuno, 2000). Le dialogue doit être continu et ne pas s'interrompre. Nous devons trouver des moyens de détecter le niveau de continuité et de détecter les interruptions éventuelles. La discontinuité peut être détectée par les éléments suivants :

- *Le nombre de reformulations* : le nombre des interventions du système pour demander à l'utilisateur de choisir entre plusieurs préférences incompatibles est comptabilisé. Par exemple, l'utilisateur peut exprimer une préférence, alors qu'il a déjà exprimé le contraire quelques temps auparavant. Ce nombre de reformulations peut être le signe que l'utilisateur ne trouve pas ce qu'il souhaite ou qu'il se lasse. Il se peut aussi que le système voit des contradictions là où il n'y en a pas pour l'utilisateur.
- *Le nombre d'abandons* : à chaque fois que l'utilisateur quitte une étape courante pour revenir à l'étape précédente, nous comptabilisons ce que nous appelons un abandon. Un trop grand nombre d'abandons peut montrer que l'utilisateur se lasse ou ne trouve pas les réponses qui lui conviennent, mais aussi éventuellement que le système et l'utilisateur sont en situation d'incompréhension mutuelle.

L'efficacité désigne le fait d'atteindre le but principal, sans prendre en considération les moyens utilisés. Il s'agit d'arriver à un résultat validé par l'utilisateur.

- *Le nombre d'interactions* : chaque interaction entre l'utilisateur et le système est comptabilisée. Un trop grand nombre d'interactions peut être le signe d'un problème d'efficacité et/ou de fluidité du dialogue
- *Validation d'une légende* : dès qu'une légende est validée comme légende finale par l'utilisateur, le processus de conception est considéré comme terminé. Le but principal du dialogue est atteint. Les légendes qu'il est possible de valider sont bien évidemment des légendes complètes, c'est-à-dire dont toutes les lignes sont renseignées (cf. paragraphe suivant sur l'évaluation d'une légende).

L'efficience désigne le fait d'atteindre le but principal avec le minimum de moyens engagés possibles. Dans notre contexte, nous considérons les moyens engagés comme des aspects subjectifs tels que la patience et la motivation de l'utilisateur. Nous choisissons comme critères à évaluer, le temps de la conception : la durée de chaque phase et la durée totale du dialogue. D'autres critères plus difficiles à traiter n'ont pas été pris en compte dans le cadre de cette thèse parce qu'ils reposent sur des connaissances difficiles à acquérir, comme la perte de motivation, et difficile à évaluer.

- 2- Évaluation de la légende en cours de construction :** l'évaluation de la légende en cours de construction se fait selon des critères de complétude, de satisfaction des règles cartographiques et de satisfaction des préférences de l'utilisateur.
4. **Décision :** la tâche de décision consiste à proposer une solution à l'utilisateur en fonction de l'évaluation du dialogue. Deux résultats d'évaluation sont possibles : soit le dialogue se déroule bien, soit le dialogue est bloqué. Si le dialogue est bloqué, il peut s'agir d'un problème local ou d'un problème général à résoudre :
- (a) Le dialogue se déroule bien : activer l'action système suivante,
 - (b) Le dialogue est localement bloqué, c'est-à-dire qu'il existe un point de blocage dans une interaction : cela nécessite d'être réglé directement avec l'utilisateur, nous parlons d'action système de type **réparation locale**,
 - (c) Le dialogue est globalement bloqué, c'est-à-dire qu'il existe un blocage général pas nécessairement lié à l'interaction courante : cela nécessite une intervention du système à un niveau plus général, nous parlons d'action système de type **réparation globale**. Il se peut aussi que toutes les réparations locales aient échoué et qu'il faille trouver une alternative.
5. **Réparation :** la tâche de réparation consiste à proposer une solution en cas de détection d'un problème lors de l'évaluation du dialogue. Deux types de réparation peuvent être utilisés par le système : des réparations locales (1) et des réparations globales (2).

1- Réparations locales. Comme nous l'avons décrit précédemment, une réparation locale consiste à régler un point de blocage survenu pendant l'interaction courante, directement avec l'utilisateur. Les réparations locales s'appuient sur des *négociations* avec l'utilisateur. Elles ne modifient pas le plan de résolution courant, ni la stratégie courante.

2- Réparations globales. Comme nous l'avons décrit précédemment, une réparation globale consiste à régler une situation de blocage qui n'est pas nécessairement liée à l'interaction courante, mais à une évaluation critique de l'état général du dialogue. Ce type de réparation peut être aussi choisi parce que les réparations locales ont échoué. Si le dialogue est en situation bloquée ou impasse, le système doit proposer une alternative plus globale que les propositions de réparations présentées aux paragraphes précédents. Nous partons du principe qu'une raison du blocage est que la stratégie de dialogue courante n'est pas adaptée à l'utilisateur : que ce soit le type de stratégie qui ne lui convienne pas – une stratégie plus directive serait-elle plus adaptée ? – ou que la manipulation d'une des sources d'inspiration ne lui convienne pas – la stratégie courante n'est pas la bonne, il faut en changer.

Avancer d'une étape : mode directif. Cette solution consiste à prendre une décision pour l'utilisateur. Si la situation est bloquée en phase 2, le système propose des solutions variées de légendes, éventuellement réalisées indépendamment de toute préférence de l'utilisateur, afin qu'il puisse se faire une idée de ce qu'il est possible de faire. Le système pourrait éventuellement lui suggérer des pistes. Une fois les solutions proposées, il reprend la méthode de conception dans l'ordre et peut retoucher une solution qui lui convient. Si la situation est bloquée en phase 3, les solutions proposées sont les réparations locales ou la solution suivante qui consiste à changer la stratégie de dialogue courante.

Changer de stratégie courante : mode coopératif. La solution que le système va proposer dans cette réparation consiste à changer de stratégie courante, en partant du principe que l'utilisateur sera peut-être plus à l'aise avec l'autre stratégie. Deux options sur les préférences sont possibles : soit ses préférences déjà acquises sont conservées, soit elles sont supprimées pour repartir d'une situation complètement nouvelle. Deux options sur les légendes sont possibles : soit les légendes test déjà construites sont conservées, soit elles sont supprimées. Les légendes test construites avec la stratégie 1 pourraient être utilisées de nouveau pour faire des comparaisons avec les nouvelles légendes construites avec la stratégie 2. Ceci n'est cependant pas implémenté.

Relaxer des contraintes : le blocage du dialogue peut être dû au fait que la situation est sur-contrainte : l'ensemble des contraintes de l'utilisateur ne peut pas être satisfait. Le contrôleur de dialogue prend la décision de relaxer des contraintes : il peut demander de l'aide à l'utilisateur afin que lui-même choisisse quelles contraintes supprimer ou il relaxe une contrainte au hasard. Le mieux serait de relaxer la (ou les) contrainte(s) qui rend(ent) le problème sur-contraint. Sinon nous

pouvons attribuer des priorités aux contraintes avec l'aide de l'utilisateur afin de savoir quelles sont les contraintes à conserver obligatoirement (les contraintes fortes) et celles qui peuvent être relaxées (les contraintes faibles).

Le modèle de dialogue finalement proposé est visible figure 2.46, il est composé de trois sous-modèles :

1. le moteur : contrôleur, stratégie de conception, actions système, actes utilisateur, historique
2. les variables du système : légendes et contraintes,
3. les objets du dialogue : système de référence des couleurs, échantillons cartographiques, tableaux de peintres.

Ce modèle a été mis en œuvre pour aider un utilisateur à concevoir une légende cartographique, en s'appuyant sur notre méthode coopérative, dans le prototype COLorLEGend (COLLEG) développé sur la plateforme GeOxygene du COGIT. La conception de légendes à partir d'échantillons et de palettes, ainsi que le moteur de gestion de contraintes ont été re-implémentés par le service des développements à l'IGN, en particulier par Lucille Ricaud et Arnaud Braun, afin de créer l'application Colorado (Lafay et al., 2015).

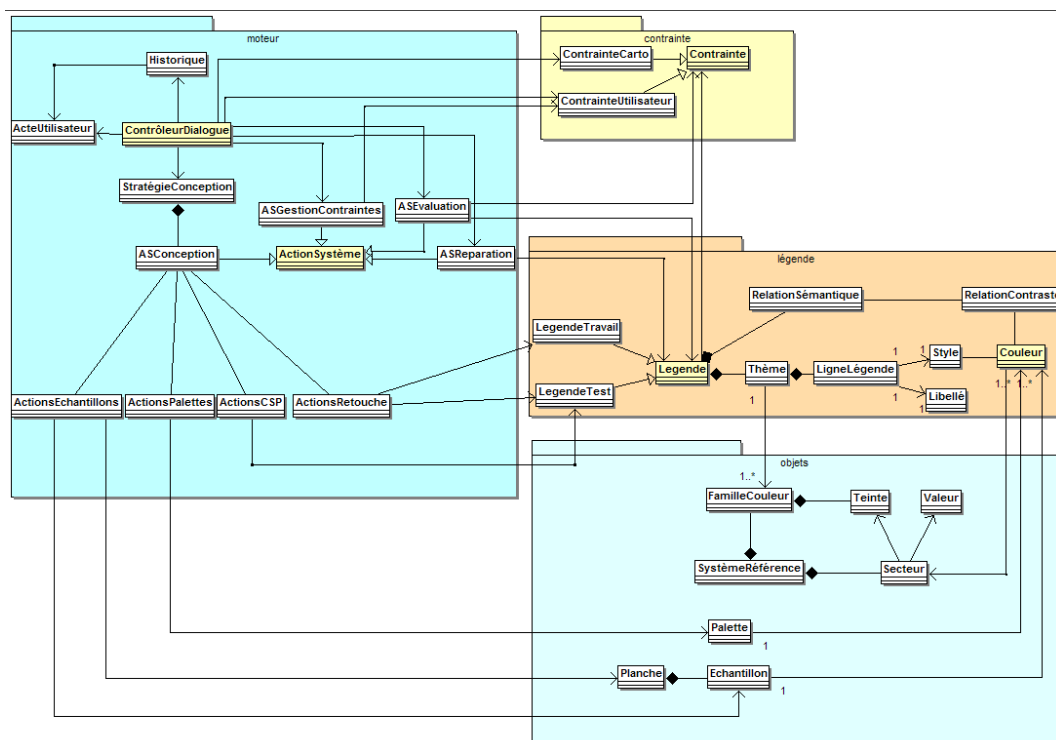


FIGURE 2.46 – Diagramme de classes du modèle de dialogue (Christophe, 2009a)

2.6.3 Évaluation : utilisabilité de l'aide au choix des couleurs

Je résume ici les grandes lignes de cette évaluation, qui est décrite précisément dans mon mémoire de thèse.

Afin de valider les propositions de ma thèse, j'ai fait tester le prototype COLorLEGend par divers utilisateurs. J'ai cherché des profils variés d'utilisateurs, en termes de niveau de compétence en cartographie, en géomatique, en informatique et en graphisme, ayant des usages plus ou moins importants des applications Internet en général et des données géographiques, ainsi que plus ou moins de sensibilité artistique. Les propriétés attendues du prototype étaient les suivantes, mises en regard des évaluations réalisées :

1. *accessible* à tout type d'utilisateur : l'interface a donc été évaluée (ergonomie, appropriation).
2. *efficace*, c'est-à-dire à la fois d'arriver à un résultat de légende correcte et satisfaisante pour l'utilisateur et d'avoir un dialogue satisfaisant : d'une part, la légende a été évaluée (réussir à

construire au moins une légende, complète, être satisfait d'un résultat, vérifier l'adéquation entre le respect des contraintes (satisfaction du système) et la satisfaction de l'utilisateur), d'autre part le dialogue a été évalué également (qualité et souplesse des interactions avec le système, capacités du système à faire face à des problèmes pouvant survenir au cours du dialogue en proposant des solutions de réparation, auto-estimation du rôle actif joué (ou non) dans le dialogue, qualité de l'espace de créativité offert, et stimulation de la créativité par le dialogue).

3. *efficient*, c'est-à-dire que la conception se fasse suffisamment rapidement par rapport à un contexte similaire de conception avec un logiciel de cartographie numérique : les utilisateurs sont chronométrés durant toute leur démarche de conception. Il est nécessaire de vérifier que l'application permet une conception rapide, mais aussi d'évaluer si le prototype est suffisamment flexible et adapté, pour tester des choix de couleurs, et laisser libre cours à sa créativité (et donc prendre le temps de la conception).

Par ailleurs, il est apparu important d'évaluer si l'utilisateur comprend et adhère à la méthode proposée : à la fois à la démarche globale (compréhension intuitive des étapes de conception : est-ce que la démarche "exploration large suivie d'un focus sur des légendes satisfaisantes à retoucher" est compréhensible, intuitive et favorise la créativité?), et à la pertinence des sources d'inspiration (utilité et efficacité, favorisent ou empêchent la créativité? les peintures sont-elles jugées trop éloignées du problème traité?).

Les résultats et leur analyse sont décrits plus précisément dans le mémoire. Pour résumer, le prototype COLorLEGend, utilisant notre modèle de dialogue, a effectivement permis de créer des légendes personnalisées et originales, qui satisfont les utilisateurs. La plupart des utilisateurs a également observé "s'être amusé" à utiliser le prototype. Les experts cartographes ont également noté l'originalité des légendes construites ainsi que l'efficacité et l'intérêt du modèle.

Des remarques ont été apportées sur l'interface qui reste à améliorer, surtout pour accompagner les utilisateurs novices. Le système doit également être optimisé pour la construction de nombreuses légendes. Nous remarquons que peu d'utilisateurs ont utilisé la fiche d'évaluation des contrastes de teinte et de valeur : ce sont des novices qui sont allés chercher cette information. Une remarque générale serait de permettre aux utilisateurs de revenir en arrière de façon plus souple encore afin de pouvoir tester et re-tester des couleurs. La plupart des utilisateurs a effectivement fonctionné de façon linéaire en déroulant les étapes 1 à 4 ; seuls quelques-uns sont revenus sur leurs choix initiaux pour relancer le processus et voir comment les légendes construites évoluent. Encore une fois, le facteur "découverte" joue un rôle important auprès des utilisateurs de ce test.

Finalement, nous notons que les utilisateurs novices ont du mal à juger leur propre résultat, car ils ne savent pas s'il est cartographiquement correct et créatif : les utilisateurs novices sont demandeurs de plus de critères qu'ils peuvent comprendre rapidement pour évaluer leurs cartes. Ils souhaiteraient également pouvoir connaître les règles qui sont effectivement utilisées pour manipuler les couleurs choisies.

Chapitre 3

Modèle(s) de style

Au-delà de la question du choix des couleurs pour représenter des relations sémantiques (hiérarchiques) dans la carte, il est important de s'intéresser non seulement aux autres variables visuelles, mais également à des propriétés visuelles de plus haut-niveau permettant de contrôler la qualité d'une représentation graphique. S'intéresser aux couleurs implique déjà des questions de perception visuelle (relations signe-sens et sens-sens), il est important maintenant de considérer ce qui est saillant (visuellement et cognitivement) pour l'utilisateur dans une carte : qu'est-ce que l'utilisateur perçoit comme caractéristique(s) visuelle(s) importante(s) dans une carte topographique ? Qu'est-ce que l'utilisateur identifie, reconnaît et associe à une catégorie de choix de représentations graphiques (cartes, légendes, couleurs, etc.) qui l'intéressent, qui ont du sens pour lui et qui l'aident à mieux comprendre l'espace géographique représenté. Acquérir et contrôler ces connaissances permettrait d'aider à la conception de nouvelles cartes topographiques de qualité, et d'aider à la personnalisation des représentations graphiques aux utilisateurs et aux usages. Il est nécessaire tout d'abord d'identifier ces variables et propriétés visuelles, afin ensuite d'en maîtriser la génération, pour les reproduire à partir de données géographiques.

3.1 Besoins sur le contrôle du style en cartographie

3.1.1 Vers plus d'expressivité, de photo-réalisme, d'efficacité

Vers plus d'expressivité. En cartographie, avoir des moyens de rendre la carte plus expressive permettrait de faciliter la transmission d'un message, en accentuant l'intention de l'auteur, en soulignant plus fortement ou en atténuant certains aspects dans la carte. Les cartographes utilisent de plus en plus de média traditionnels pour faire passer un message, jusqu'à par exemple, revenir au dessin cartographique aux crayons de couleurs de P. Rekacewicz pour insister sur la force, la tension et l'intensité des relations spatiales entre les dimensions de phénomènes géographiques ou sociologiques ainsi que pour souligner la colère de l'auteur ou l'injustice des situations représentées¹. En parallèle, les logiciels utilisés pour faire des cartes ne permettent pas toujours de pouvoir utiliser de tels outils de dessin, qui sont proposés par des logiciels de dessin vectoriel ou de traitement d'images, mais pas accessibles dans un SIG : la combinaison de la capacité des techniques de rendu avec l'expertise sur les données géographiques et leurs représentations graphiques permettrait une plus grande expressivité et une plus grande créativité dans la conception cartographique. En particulier, dans le cadre du projet ANR MapStyle (2012-2016), nous avons identifié trois grands types de *techniques de rendu expressif à intégrer dans un SIG*.

Dans un contexte de conception cartographique, la plupart des tracés et dessins des cartes de la figure 3.1 ont été réalisés à la main (montagne, Cassini) voire scannés pour être re-utilisés dans une chaîne de production actuelle (montagne), ou, réalisés numériquement et positionnés un par un, à l'aide d'un logiciel ad-hoc (végétation). Le premier type de dessin concerne le **remplissage de surfaces dans une carte par des motifs de textures expressives**, permettant une meilleure compréhension de l'occupation du sol et du relief en particulier : les extraits de cartes de montagne (Figure 3.1 à gauche) montrent des représentations des zones rocheuses et des éboulis très expressifs afin de mettre en évidence la morphologie du relief ; le type de végétation dans la carte en haut à droite est représentée par une distribution particulières de motifs choisis : cette représentation a été abandonnée dans le chaînes de production actuelles, au profit d'aplats colorés car la production de ces rendus était trop coûteuse en

1. <http://blog.mondediplo.net/2013-12-22-Cartes-en-colere>

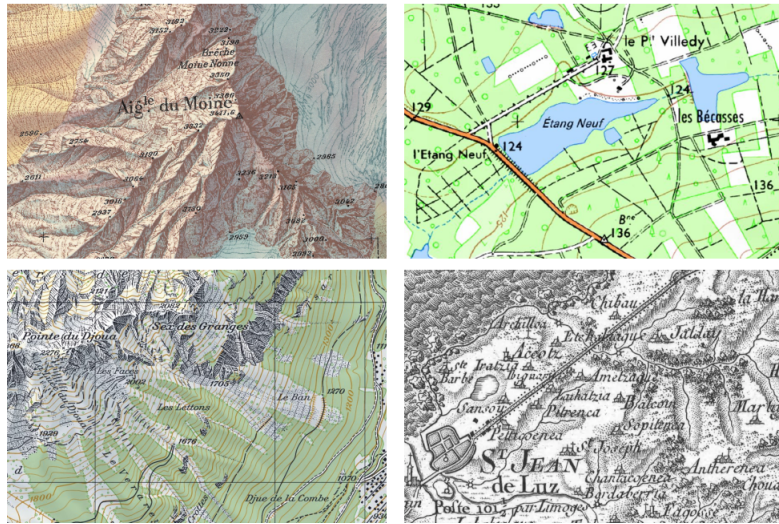


FIGURE 3.1 – Ce qu'on ne sait pas dessiner automatiquement et contrôler dans un SIG (motifs de texture, stylisation linéaire) (Christophe et al., 2016).

termes de temps de main d'œuvre; l'extrait d'une carte de Cassini, en bas à droite, met en évidence des textures de remplissage (mer, végétation, occupation du sol diverses) particulièrement stylisées.



FIGURE 3.2 – Sources d'inspiration pour l'expressivité des traits (stylisation linéaire) et pour les effets de dilution et aquarellisation en peinture (effets raster) (Christophe et al., 2016).

Le deuxième type de dessin concerne la **stylisation linéaire** : dans un SIG, on ne peut contrôler que l'épaisseur d'un objet linéaire tout au long de cet objet, mais non une épaisseur variable ou la courbure d'un linéaire, on ne peut pas non plus contrôler l'outil de dessin nous permettant de dessiner des traits au crayon, pinceau, brosse, par exemple, tels que dans la carte de Cassini ou dans les sources d'inspiration issues de la peinture dans la figure 3.2 . Le troisième type concerne l'**application d'effets aux images** tels que des filtres ou mélange pour reproduire des effets de dilution ou d'aquarellisation. Ce type de rendu implique de maîtriser des techniques de mélange de couches en particulier.

Le style des cartes de Cassini et le style "peinture" (aquarelle et Derain) vont être analysés plus précisément en section 3.2.1. Le dessin du rocher en montagne sera analysé en section 3.2.4.

Vers plus de (mix entre abstraction et) photo-réalisme. L'abondance de données géographiques, bases de données vecteur et ortho-images en particulier, permet aux utilisateurs de visualiser dans des

géoportails avec des points de vue différents, des représentations différentes du territoire. Selon les usages des utilisateurs, qu'ils soient experts ou grand public, certaines données et représentations sont parfois plus adaptées, privilégiées ou préférées, pour, par exemple, se repérer, prévoir et dessiner un itinéraire de randonnée, ou superposer des données métiers. Les fonctionnalités de visualisation des géoportails permettent également de plus en plus de co-visualiser ces données et représentations hétérogènes, c'est-à-dire de visualiser ensemble dans une même interface deux types de couches d'information : soit en jouant sur la transparence entre les deux couches concernées (en particulier, carte et ortho-image), soit en intégrant des outils d'interface spécifique permettant d'accéder au contenu d'une couche à partir d'une autre (lentilles, sliders, etc.). Il n'est pas toujours aisé de se repérer facilement quand on passe d'une représentation à une autre, et ces co-visualisations permettent de faire un lien visuel entre représentations afin de préserver l'attention.

Certaines études sur l'utilisabilité des cartes vs. l'utilisabilité des ortho-images pour réaliser des tâches classiques de cartographie montrent que, même si les utilisateurs vont privilégier des vues photo-réalistes qu'ils trouvent plus faciles à comprendre, la réussite des tâches se fait mieux sur des cartes, alors qu'également les niveaux d'abstraction dans les cartes peuvent être difficile à appréhender par les utilisateurs. Ce type de résultat varie néanmoins selon la tâche de cartographie considérée, le niveau d'expertise des utilisateurs et le contexte d'utilisation. Des états de l'art et revue de l'existant sur les outils actuels sont disponibles dans (Hoarau, 2015; Hoarau and Christophe, 2016). Pour nous, cela questionne la notion de style plus adapté à un usage ou à un type de géovisualisation : est-ce que l'abstraction est plus efficace que le photo-réalisme, ou le contraire, et dans quel contexte? Est-ce que fournir des moyens de passer de l'un à l'autre dans les outils de géovisualisation ne serait pas plus efficace pour aider à la personnalisation et favoriser une plus grande efficacité de la représentation? La question de l'usage nous amène à penser que le tout photo-réaliste ne résout pas tous les problèmes de compréhension, dans le cadre de la concertation citoyenne par exemple : on tend donc à mixer et à proposer un niveau de contrôle des deux styles extrêmes de représentation topographique, abstraction/photo-réalisme, afin d'être en capacité de répondre à des besoins et préoccupations variées, nécessitant du photo-réalisme pour reconnaître ce qu'on connaît déjà du territoire (ne pas reconnaître son propre territoire à cause d'un rendu "exotique" n'est pas très utile), et de l'expressivité pour comprendre un phénomène sur le territoire (l'ajout d'une nouvelle donnée, l'ajout d'information à discuter, donc dans un état d'ébauche, etc.). L'idée est similaire à mixer du géotypique, i.e. restituer une ambiance ou un style de paysage typique et reconnaissable, et du géospécifique, i.e. reproduire exactement, complètement et en détail, un paysage en termes d'objets (bâtiments, végétation, ouvrages d'art, etc.).

A partir de ce constat, il semble pertinent de considérer (à nouveau) des représentations cartographiques intégrant plus de photo-réalisme, et mixant abstraction et photo-réalisme, ou de pouvoir passer d'une représentation non photo-réaliste à une représentation photo-réaliste, afin d'être plus efficace au regard des usages des utilisateurs.

Ce besoin implique d'*explorer et proposer des techniques de conception et de rendu*, au-delà de la gestion pure et simple de la transparence entre deux couches de données, *pour co-visualiser cartes, données vecteur et ortho-imagerie*². Il est nécessaire de *trouver des méthodes pour passer de façon continue d'un type de représentation à un autre*. Ce besoin implique également d'*ajouter d'autres types de données géographiques ayant une plus grande précision* et améliorer ainsi la perception du réalisme, *en jouant sur des stylisations adaptées, en particulier la manipulation des paramètres graphiques tels que textures et couleurs*.

Vers plus d'efficacité. La question qui sous-tend tous nos travaux est celle de l'efficacité de la carte. Les besoins précédents visent cette efficacité, et questionnent également nos habitudes d'utilisation des représentations graphiques du territoire. En particulier la carte est construite à partir de codes graphiques qu'en tant qu'utilisateurs d'un ou de plusieurs types de cartes, nous avons l'habitude de voir, lire, utiliser. Cette habitude d'utilisation implique que notre efficacité de lecture est augmentée lors de la n-ième lecture de la x-ième carte, par rapport aux fois précédentes certainement, en tous cas, par rapport à un autre utilisateur de cette même carte qui n'est pas habitué à ces codes visuels. De plus la connaissance du territoire emprunté ajoute à cet effet de reconnaissance du territoire représenté, et donc de compréhension de ce territoire. Les agences de cartographie nationales comme les fournisseurs de données et de cartes sur le monde entier ont leur propres codes graphiques, que leurs utilisateurs ont inconsciemment intégrés : en tous cas, lors de l'utilisation d'un code totalement nouveau, il y a un temps de nécessaire d'adaptation, et

2. Cf travail de Charlotte Hoarau préalable à sa thèse sur l'analyse comparée des visualisations par défaut (carte ou ortho-image) et des fonctionnalités de co-visualisation, dans une série de géoportails (Hoarau, 2012)).

l'utilisateur peut également faire face à des incompréhensions sur ce qui est ou non représenté. Pour les agences de cartographie, nous supposons que ces codes graphiques sont liés à la géographie, à l'histoire et aux pratiques cartographiques du territoire concerné. Pour Google Maps, les codes graphiques sont liés à un souci de facilitation de la lecture : quand Google re-intègre les représentations spécifiques par pays des symboles des transports en commun (ex. : représentation typique des stations de métro par ville/pays), il s'agit de s'adapter à la compréhension et aux habitudes de l'utilisateur, pour améliorer le repérage visuel et l'efficacité de la carte.

En cartographie, nous avons besoin d'être capables de spécifier le code graphique reconnaissable d'un ensemble de cartes, afin de pouvoir l'utiliser pour répondre à des besoins des utilisateurs. En particulier, connaître ce qui fait qu'un utilisateur reconnaît une carte/légende/extrait de carte IGN permettrait de re-utiliser ce code visuel afin d'aider l'utilisateur à se repérer visuellement lors d'un changement d'échelle, par exemple (pour l'instant, l'utilisateur fait des sauts conceptuels entre différents types de représentations cartographiques à chaque changement d'échelle, perturbant la navigation et la compréhension des objets du territoire observés), à comprendre un nouveau territoire à explorer à partir d'un code graphique qu'il maîtriserait déjà, ou permettrait de résoudre des problèmes de choix de conception cartographique sur des territoires situés aux frontières de différents pays, codés graphiquement différemment, et observés/empruntés/utilisés avec des points de vue différents de part et d'autre de la frontière.

Transition vers la notion de style Ces différents besoins d'identification, de caractérisation et de mise en œuvre de propriétés visuelles, à tous les niveaux de la variable visuelle-même à des arrangements visuels particuliers, à appliquer sur des données géographiques pour améliorer l'efficacité des représentations du territoire m'ont invitée à me rapprocher de la notion de style, en général, et en particulier dans les domaines de la géomatique et de la cartographie. Nous verrons dans la partie suivante, comment la notion de style en général, fait référence à un ensemble de pratiques de conception, qui sont reconnaissables visuellement : l'intérêt dans les domaines de conception est d'être capables de spécifier les règles de génération des objets graphiques. Cette notion nous permet en termes de représentation (conceptuelle) des connaissances, de spécifier au mieux les objets à représenter (graphiquement), la façon dont on décrit cette représentation, et la façon dont on applique effectivement cette représentation.

3.1.2 Spécification et contrôle du style

Définitions et positionnement

Dans (Christophe, 2012a), j'ai décrit différentes définitions du terme 'style'. Le dictionnaire Larousse donne entre autres : "Ensemble des caractères formels esthétiques de quelque chose". En architecture, le style concerne des manières de construire, d'utiliser certains matériaux, formes et structures. Un style d'art fait référence à l'apparence visuelle d'un travail artistique qui est proche d'autres travaux du même artiste ou d'un autre de la même période, formation, localisation, "école", mouvement artistique ou culture archéologique³. Je souligne en particulier cette citation d'Ernst Gombrich comme définition du mot 'style' : "...any distinctive, and therefore recognizable, way in which an act is performed or an artifact made or ought to be performed and made."⁴. L'article majeur sur le sujet est '*Defining Pictorial Style : Lessons from Linguistics and Computer Graphics*' de (Willats and Durand, 2005) proposant un cadre méthodologique pour l'analyse du style en informatique graphique, à partir des connaissances en stylistique, branche de la linguistique générale. Les auteurs visent à avoir une démarche similaire à celle de la stylistique concernant l'analyse du style dans des images : la plupart des individus sont capables de reconnaître des similarités et des différences stylistiques entre diverses écoles de peinture ou dans des travaux d'artistes. L'analogie avec le langage suggère que reconnaître ces différences pourrait dépendre d'une connaissance implicite des règles graphiques (comme des règles de grammaire) qui ont généré ces images. Le problème à résoudre selon les auteurs est alors le suivant : **comment rendre ces règles explicites ?**

L'ensemble de ces définitions et celles reprises dans (Christophe, 2012a; Ory et al., 2015b) nous intéressent en cartographie car elles font référence à la fois au processus de conception ('faire') et à la reconnaissance du résultat ('reconnaître') comme faisant partie d'une catégorie d'objets caractéristiques ('catégoriser'). De la même façon que pour les autres domaines cités, le style en cartographie est un problème de catégorisation, d'une ou de plusieurs carte(s) ou d'un ensemble de caractéristiques visuelles

3. https://en.wikiquote.org/wiki/Style_of_art

4. Ernst Gombrich, "Style" in : International Encyclopedia of the Social Sciences, ed. D. L. Sills, xv (New York, 1968)

dans une carte (légende, extrait de carte, arrangements de signes graphiques, etc.), dans une famille cartographique.

Approches du style en cartographie

Dans (Christophe, 2012a), à partir de l'état de l'art et d'une revue de l'existant, j'avais proposé trois types d'approches pour catégoriser des styles en cartographie, selon qu'on utilise des cartes existantes ou des sources d'inspiration telles que des images artistiques, qui ont déterminé la suite de mes travaux de recherche, en collaboration avec d'autres chercheurs et par l'encadrement de doctorants et de post-doctorants. La Figure 3.3 illustre ces trois approches :

1. **Catégorisation visuelle de cartes existantes** (Christophe, 2009a) : l'approche consiste à faire catégoriser des cartes ou des échantillons de cartes, par des experts cartographes, et de leur faire nommer et/ou caractériser les catégories proposées. Il s'agit donc de déterminer les propriétés visuelles utilisées pour la catégorisation.

Au COGIT, des travaux précédents avaient permis de classer des échantillons de cartes grâce à des descripteurs de cartes (lumineuse, pastel, riche, sobre, de couleurs chaudes, originale et réaliste) (Dominguès and Bucher, 2006). Avec Catherine Dominguès (IGN/COGIT), nous avons poursuivi en cherchant à faire catégoriser visuellement ces échantillons par des experts en cartographie. Nous avons ainsi testé un ensemble d'échantillons de cartes, i.e. un même espace géographique représenté par des légendes différentes. Un premier objectif a été de grouper visuellement ces échantillons, par binôme d'experts, et de nommer les groupes constitués. Un deuxième objectif était d'utiliser un deuxième ensemble d'échantillons, i.e. des extraits de cartes européennes existantes représentant le même type d'espace géographique et à la même échelle que le premier groupe d'échantillons, et de les ajouter aux groupes existants, de modifier les groupes ou de créer de nouveaux groupes pour regrouper visuellement ces nouveaux échantillons avec les précédents. L'idée de cette expérimentation était de chercher les caractéristiques visuelles saillantes utilisées par les experts pour réaliser rapidement leurs groupes : la dénomination des groupes est souvent un bon indicateur de la ou des caractéristique(s) visuelle(s) utilisée(s). Sont ressortis en majorité, les teintes ou valeurs de teinte dominantes ("tons rouges", "citron", "bleu-vert fades", "harmonie de couleurs", etc.), la saillance du réseau routier ("carte d'auto-école", "les routiers", "maillage", "réseau contrasté", etc.), l'impression générale donnée par la carte ("lumineux", "artistiquement moche", "urbaines", "vacancières", "pas pratique", etc.). Ce qui ressort de cette expérimentation est la perception de couleurs saillantes pour deux types de contrastes :

- présence d'un contraste de quantité renvoyant aux groupes caractérisés par une ou plusieurs couleurs correspondant en général aux couleurs des aplats (fond cartographique, mer, forêt)
- présence d'un contraste de teinte et de valeur faisant ressortir un type d'objets géographiques, comme le réseau routier : si la forme et la structure du réseau sont caractéristiques, la saillance est encore plus importante.

*Ces travaux m'ont confirmée dans l'approche globale de nos recherches sur les **contrastes de couleurs, provenant de choix de couleurs et de structures spatiales particulières** comme propriétés visuelles majeures à considérer pour apprendre sur la conception cartographique et la perception du sens dans les cartes. Ils sont donc à la base des travaux suivants.*

2. **Analyse des spécifications de légende et de style de grands producteurs de cartes** : l'approche consiste à spécifier des styles de cartes topographiques issues de grands producteurs connus (institutionnels, Google Maps, OSM, etc.) et qui sont a priori reconnaissables par les utilisateurs.

Il s'agit d'identifier les caractéristiques visuelles utilisées par les utilisateurs pour dire si telle ou telle carte fait partie de tel ou tel style topographique, à partir des spécifications existantes des chaînes de production cartographique. L'hypothèse est qu'une analyse seule des différences de légendes est insuffisante pour faire cette catégorisation et qu'il faut aller chercher du côté des autres processus amont dans la conception cartographique (généralisation, en particulier) mais également dans la structuration spatiale des entités du monde réel représentées dans la carte.

Cette approche sera explorée dans la thèse de Jérémie Ory (2012 - 2016).

3. **Spécification de styles artistiques à partir de sources d'inspiration** : l'approche consiste à spécifier des styles artistiques que l'on voudrait pouvoir reproduire dans une carte.

La difficulté est de décrire le style attendu : quelle(s) sont les caractéristique(s) visuelle(s) saillante(s) dans l'image source qu'on cherche à être capable de reproduire dans une carte? Les choix et arrangements de couleurs étaient l'objectif de ma thèse de doctorat ; il a été nécessaire ensuite de travailler sur d'autres variables visuelles et arrangements de ces variables afin d'être capable de reproduire des styles artistiques.

Cette approche sera explorée dans le projet ANR MapStyle (2012 - 2016).

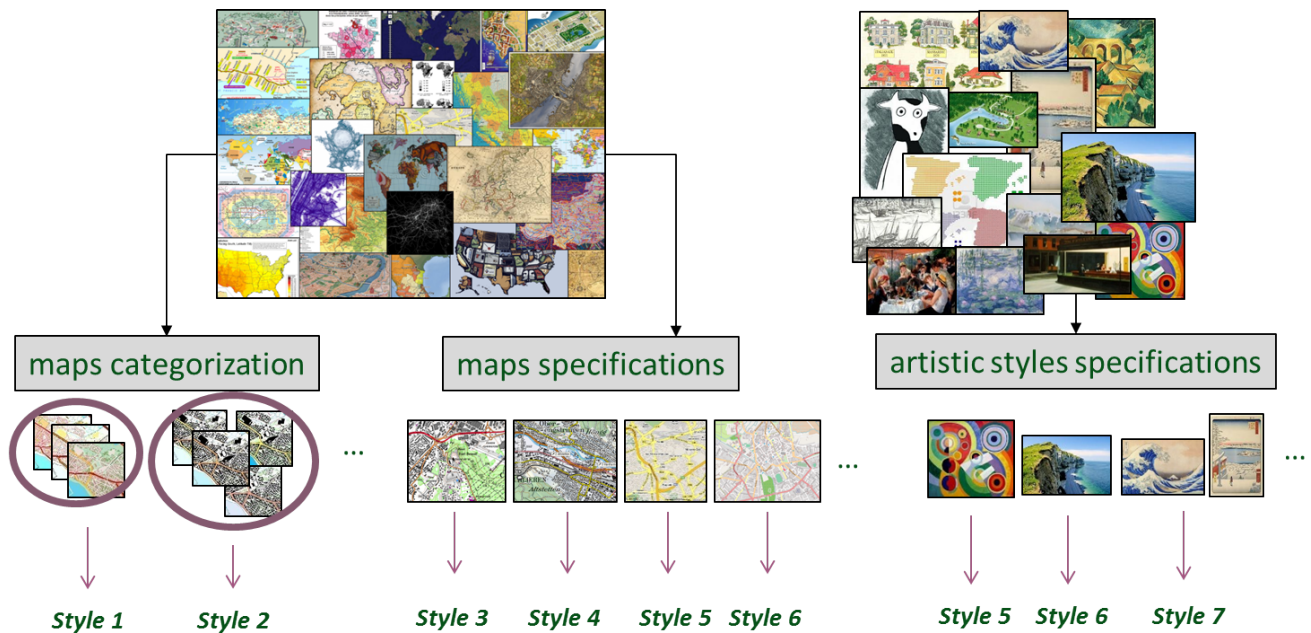


FIGURE 3.3 – Approches pour catégoriser des cartes dans des styles (Christophe, 2012a)

3.1.3 Problématique : comment paramétrer et contrôler les paramètres graphiques pour faire varier le style final de la carte ?

A partir de ces approches, je re-formule les trois problèmes suivants sur la modélisation du style, dans l'objectif de trouver les bons arrangements de caractéristiques visuelles pour faire varier le style final de la carte, qui formeront les trois sections suivantes de ce Chapitre :

1. Quelles sont les spécifications de dessin et comment les décrire pour concevoir des rendus expressifs en cartographie? Nous nous sommes principalement intéressés à l'extraction de caractéristiques visuelles saillantes dans des images sources et à la reproduction de ces caractéristiques visuelles via la modélisation de la spécification du rendu et des méthodes de rendu associées (projet ANR MapStyle 2012 - 2016) (Cf. 3.2 et 3.3.3).
2. Comment utiliser, tester et explorer les diverses spécifications de dessin développées, sur des données géographiques hétérogènes et à différentes échelles de représentation, pour générer des cartes ou visualisations topographiques correspondant aux grandes familles caractéristiques du rendu, de l'abstraction et du photo-réalisme (projet ANR MapStyle, projet PEPS Plu++ et axe de recherche GeoVIS), i.e. explorer les arrangements via les espaces de paramètres (Cf. 3.3).
3. Quelles sont les composantes du style topographique, comme association d'un ensemble de caractéristiques visuelles à une famille de cartes, avec les exemples IGN et Swisstopo (Thèse de Jérémie Ory 2012 - 2016), i.e. qu'est-ce qui fait qu'on associe un élément de représentation à une famille de représentation cartographique? (Cf. 3.4)

L'objectif applicatif de ces travaux est de fournir des formalisations du style de rendu en topographie, permettant de contrôler la représentation graphique finale, et de préciser leurs couplages avec les modèles de données et de légende existants.

3.2 Spécification et rendu du style : exemple du rendu expressif

"Le **rendu expressif**, aussi appelé non-photoréaliste (NPR en anglais) concerne l'ensemble des techniques de rendu qui ne s'intéressent pas à reproduire fidèlement les lois de la physique (i.e. matériaux réalistes et illumination globale). Cette définition reste vague et en pratique, la grande majorité des approches en rendu expressif **imitent ou s'inspirent des média traditionnels** : peinture à l'huile, dessin au trait, aquarelle, etc. Il serait cependant réducteur de considérer que le rendu expressif ne se limite qu'à simuler de tels média; tout comme en peinture et dessin, il faut d'abord se poser la question de ce que l'image est sensée représenter. Pas seulement la nature du sujet, mais surtout les aspects qui doivent être mis en avant et ceux que l'on va préférer ignorer. Car après tout, c'est l'avantage des média traditionnels sur la photographie : **pouvoir mettre en avant ou abstraire** certains aspects. (...)

Le rendu expressif en informatique graphique a de nombreux points communs avec les techniques traditionnelles; il partage les mêmes problématiques de représentation, indépendantes du médium utilisé : quels sont les **aspects importants de la scène à mettre en avant**, et quels sont ceux que l'on va préférer abstraire, voire même omettre. Il a aussi intérêt, tout du moins dans un premier temps, à imiter ses prédécesseurs : quel type de "medium" est employé (qu'il reproduise ou seulement s'inspire d'un médium traditionnel), quel type d'outil est utilisé (qu'il soit simulé ou simplement suggéré), et comment introduire le style personnel de l'artiste? " (Barla et al., 2007).

Le rendu expressif partage les mêmes objectifs de représentation, de communication visuelle et de qualité de l'image résultante (lisibilité et esthétique, en particulier) que la cartographie. Deux objectifs en particulier nous renvoient à des besoins en cartographie :

1. s'inspirer ou imiter des média traditionnels, pas uniquement pour un objectif esthétique, mais pour les utiliser pour rendre saillant ou abstraire certains éléments de l'image.
2. identifier les caractéristiques visuelles (objets, arrangements ou propriétés visuels) à mettre en avant ou à atténuer dans la carte.

Sachant qu'un ensemble de techniques de rendu existent déjà, la difficulté dans le projet a été de spécifier le(s) style(s) attendu(s) en cartographie. Des besoins ont été décrits en section 3.1. Il s'agit maintenant de s'intéresser aux techniques de rendu nécessaires pour approcher et générer ce(s) style(s), et finalement d'être capable de décrire l'ensemble des spécifications de rendu (quel est le formalisme de spécification? Est-il extensible et générique?).

Cette tâche a été réalisée par l'ensemble des partenaires du projet ANR MapStyle que j'ai coordonné de 2012 à 2016 : en particulier, il s'agit d'une partie des travaux de post-doctorat de Bertrand Duméniou (IGN/COGIT), que j'ai encadré, ainsi que des travaux d'ingénierie de Jérémie Turbet (IRIT) et de post-doctorat de Nicolas Mellado (IRIT) encadrés par David Vanderhaeghe (IRIT), de la thèse d'Hugo Loi (INRIA) financée par l'ANR et supervisée par J. Thollot, T. Hurtut, R. Vergne. Ce travail a donné lieu à une publication au Symposium NPAR'16 (Christophe et al., 2016), reprise dans une soumission pour l'ICC2017 (Christophe et al., 2017a). Dans les parties suivantes, nous décrivons les besoins en cartographie, l'architecture proposée, une extension des normes associée à une description des méthodes de rendu, et le développement de méthodes de rendu, ainsi que les résultats cartographiques que nous pouvons générer. Je résume donc le travail présenté dans le papier NPAR'16, en pointant sur les différents travaux de recherche et réalisations des partenaires du projet, afin de mettre en avant les contributions d'une telle recherche en sciences de l'information géographique.

3.2.1 Styles visés : Cassini, aquarelle, Derain

L'approche choisie ici consiste à décrire les styles artistiques visés et ensuite à déterminer les techniques de rendu adaptées pour reproduire ces styles. Je décrirai ici les styles suivants : 'Cassini' à partir d'un travail de recherche spécifique sur la représentation graphique dans les cartes des Cassini, 'aquarelle', à partir de ce que nous connaissons de la pratique et des modélisations physiques existantes de l'aquarelle, et 'Derain', à partir des limites rencontrées pendant ma thèse et de plusieurs tableaux de

Derain. Cette approche nécessitera ensuite d'être capable de spécifier correctement ces styles dans un formalisme approprié.

Cassini

Une idée du projet a été de travailler sur un style de carte existant, réalisé à la main, donc ancien, plutôt artistique, et posant des défis à résoudre de différentes natures. Les cartes des Cassini, dites par abus de langage "la carte de Cassini", se sont avérées faire partie des cartes anciennes les plus connues, les plus demandées à la Cartothèque de l'IGN, et les moins décrites concernant la partie purement représentation cartographique (pratiques de dessin et légendes). Il faut noter que l'objectif des Cassini était la précision de certaines informations, et non la qualité de la représentation graphique. Aucun document ne décrit cet aspect de la Carte de Cassini et c'était aussi un défi en recherche de faire se croiser les connaissances des chercheurs, cartographes et documentalistes sur la question des pratiques de dessin et des choix de représentation graphique dans les cartes des Cassini. Ce sujet n'avait pas été abordé jusque là, par les recherches sur les cartes de Cassini, en particulier au COGIT et à l'EHESS. Et en effet, il est rapidement devenu encore plus intéressant de comprendre les tenants et les aboutissants des choix de légende, tout simplement parce qu'ils n'étaient pas spécifiés à l'époque, ni aux ingénieurs sur le terrain ni à ceux en cabinet, encore moins aux graveurs ou aquarellistes. Pourtant, même si on observe évidemment des variations entre les cartes produites et selon les différentes séries existantes, nous faisons l'hypothèse qu'il y a un style Cassini à formaliser.

J'ai encadré le stage de M2 Carthagéo de Laurane Boulanger (2014) sur la caractérisation du style Cassini. Ce stage nous a menés à explorer les connaissances autour de la Carte de Cassini et à rencontrer des spécialistes de l'histoire des cartes de Cassini. Nous tenons à remercier :

- *Monique Pelletier, ancienne responsable du département des cartes et plans de la BNF, qui m'a accordé une conversation téléphonique des plus enrichissantes, et dont nous avons lu le livre en cherchant la moindre référence aux cartes de Cassini (Pelletier, 2013).*
- *Anne-Marie Ancel et Anne Berry, du Centre de Documentation de l'IGN, pour nous avoir permis de lire les ouvrages, "Les règles du dessin et du lavis pour les plans particuliers des ouvrages et des bâtimens" de (Buchotte, 1722)⁵, "Description géométrique de la France" de Cassini de Thury (Cassini de Thury, 1783)⁶ et "Mémoires sur les objets les plus importants de l'architecture" (Patte, 1769).*
- *Bernard Bèzes et Philippe Truquin, ancien et nouveau responsables de la cartothèque de l'IGN, ainsi que Richard Basley, Hervé Audebert, et tout le personnel de la cartothèque, qui ont partagé avec nous leurs connaissances au sujet des cartes des Cassini, et qui ont permis à Laurane Boulanger d'accéder et d'observer de nombreux documents anciens, dont les cartes des Cassini.*

Préface de Buchotte : " *Personne ne doute que pour bien peindre en écriture, il faut outre l'exercice et l'application, une main légère, avec des doigts très souples : Il en est à peu près de même du Dessin de l'Architecture militaire et civile, où il s'agit de tirer des lignes de différentes grosseurs, qui soient bien égales dans toutes leurs parties ; d'en tirer aussi qui soient bien parallèles entre elles, quelque fois fort longues et fort proches l'une de l'autre : comme aussi de laver entre ces parallèles sans en sortir de la moindre chose ; et de faire proprement les ombres coupées, ce qui n'est pas une petite difficulté pour ceux qui n'ont pas une bonne main.*" (Buchotte, 1722)

La Carte de Cassini est une des rares à ne pas avoir eu de légende ou de spécifications de dessin : l'objectif était tout autre pour cette carte et les choix de représentation graphiques n'ont pas été particulièrement guidés par des recommandations. Par contre, ce que notre analyse des cartes de l'époque, comme des ouvrages de cartographie, nous a montré, c'est que les pratiques de dessin étaient liées à la pratique en cours à l'époque décrites dans d'autres ouvrages. Néanmoins, nous avons observé une très grande diversité des choix de représentations dans les Cartes de Cassini, une grande approximation parfois dans les tracés, une abondance d'informations amenant à une complexité visuelle très importante. Il faut également noter le nombre de personnes intervenant dans la chaîne de production d'une carte de Cassini, avec des métiers et des objectifs très différents : relevés sur le terrain (ingénieurs du roi), travail en bureau ensuite (d'autres ingénieurs), retours sur le terrain (encore d'autres ingénieurs), gravure (graveurs), impression en noir et blanc (imprimeurs) et travail d'aquarellisation pour la mise en couleurs

5. <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k86599b>

6. <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b55009520h>

et la vente (aquarellistes). Notre travail s'est décomposé en trois étapes :

1. retracer (brièvement) l'histoire des choix de représentation dans les cartes de Cassini afin de choisir le type de carte à reproduire,
2. considérer les caractéristiques visuelles saillantes dans le style Cassini à partir d'extraits dans cette carte,
3. tenter de le reproduire et mettre en évidence les limites des outils existants, et fournir des recommandations pour les chercheurs en informatique graphique.

Dans ce mémoire, je vais me concentrer uniquement sur les caractéristiques visuelles que nous avons cherché à reproduire : je présente donc très rapidement l'étape 2 et plus précisément l'étape 3. De plus amples détails sur ce travail seront donnés en annexe et sont accessibles dans le rapport de stage de Laurane Boulanger (Boulanger, 2014). L'analyse de cartes n'a pas prétention à être exhaustive puisque notre objectif est de trouver des caractéristiques visuelles saillantes : la très grande variété des dessins dans les cartes de Cassini est à la fois un avantage et un inconvénient pour la spécification et la simulation du style 'Cassini'. Des études fournies par la cartothèque de l'IGN proposent des analyses plus approfondies des variations de la représentation de la végétation dans les cartes de Cassini, par exemple (Vallauri et al., 2012).

Les caractéristiques visuelles saillantes choisies par Laurane Boulanger pour décrire le style Cassini sont celles concernant la représentation du relief, de la mer, de la forêt et de l'occupation du sol, des toponymes et des pictogrammes associés, et des régions bâties, comme illustré par les Figures 3.5, 3.6 et 3.4. Ces caractéristiques sont décrites plus en détail dans le mémoire de stage, je ne conserve ici que quelques unes avec un petit descriptif sur le problème de représentation sous-jacent.

La représentation du relief. Les hachures représentent à la fois des talus ou lits de cours d'eau, comme on peut en observer autour du réseau hydrographique dans les cartes ci-dessous, mais peuvent aussi s'assimiler aux courbes de niveau d'aujourd'hui, comme dans le cas du sommet important au centre de la carte, légèrement vers le bas de l'image. Ces hachures se terminent généralement par des pointillés, peu visibles à l'échelle de la carte, mais que l'on peut distinguer en zoomant. Cependant, ces hachures ne permettent pas de quantifier l'importance de la pente : ainsi, les pentes des régions montagneuses sont quasiment identiques à celles de simples ondulations de plaine dans des régions planes. Cela est dû principalement au retard des techniques de nivellement de l'époque. Mais une autre raison est peut-être que les ingénieurs de Cassini représentaient avant tout les territoires tels que vécus par les habitants de la région. En effet, tout en effectuant des levés, les ingénieurs menaient des sortes d'enquête terrain, pour relever les éléments importants localement (calvaires, rivières, forêts, etc). Ainsi, dans une région où le relief est peu marqué, les moindres buttes sont considérées comme des points de repère par les habitants, et donc seront essentielles à représenter, alors que dans une région plus vallonnée ou montagneuse, seuls les forts reliefs seront représentés. De plus, Cassini de Thury précise dans sa Description Géométrique de la France que "l'exactitude dans la configuration du terrain est presque aussi essentielle que dans la position des objets de détail". Il argumente qu'"on ne peut former des projets utiles au commerce sans consulter la carte, la construction des chemins, la direction qu'il faut leur donner pour les rendre plus courts et plus praticables en évitant les inégalités du terrain" (Cassini de Thury, 1783). Ainsi, il lui importe de représenter les variations du relief, mais plus particulièrement dans un but pratique, pour pouvoir voyager plus facilement. C'est pourquoi toute variation du terrain considérée comme un obstacle éventuel pour les habitants doit être précisée, aussi faible soit elle.



FIGURE 3.4 – Représentation du relief dans les cartes de Cassini

La représentation de la mer. Le bord de mer est représenté par des flots en perspective, dessinés en réalité à partir de nombreuses hachures plus ou moins longues, un peu de la même manière que pour le relief, une vague étant représentée comme une pente. Les flots sont orientés selon le trait de côte, et sont structurés par des lignes principales très accidentées, globalement parallèles au rivage.

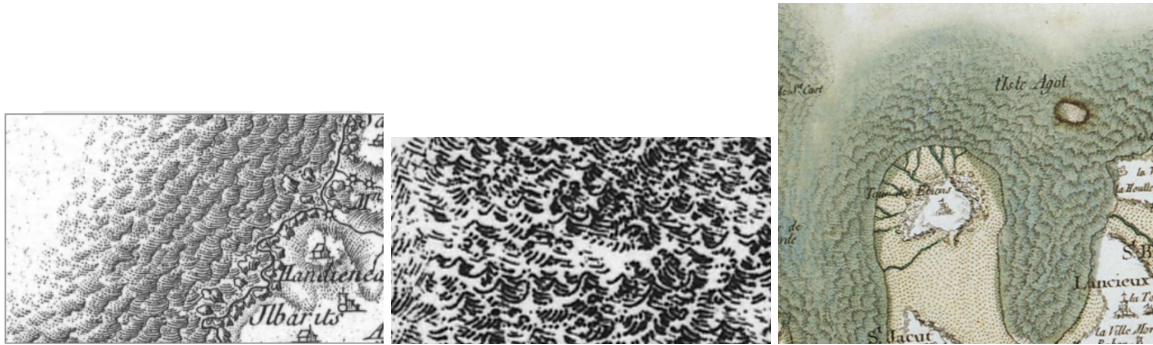


FIGURE 3.5 – Représentation de la mer dans les cartes de Cassini

La représentation de la forêt. Les types de végétation sont plus ou moins représentés selon les feuilles. Par exemple, dans les cartes des environs de Paris, seuls les bois ou forêts sont représentés, alors que dans les Landes ou vers Marseille, l'occupation du sol par la végétation est beaucoup plus détaillée. Cela peut être dû encore une fois à la volonté de Cassini de rendre sa carte utile pour les déplacements et le développement du commerce, et donc de signaler tout élément du paysage qui pourrait permettre d'optimiser les temps et conditions de trajets. Ainsi, les zones de broussailles, de marais ou de maquis sont importantes à signaler, alors que les champs plats de la région parisienne le sont beaucoup moins. Les forêts sont représentées par un ensemble d'arbres, en perspective cavalière, parfois très différents les uns des autres, ne suivant aucune norme. Taille et distribution varient beaucoup au sein même d'une même forêt. On peut cependant considérer que ces arbres se regroupent par lots de deux ou trois dans les forêts de moyenne densité, espacés de quelques buissons, beaucoup plus petits. Les touffes d'herbes dessinées à côté des arbres donnent une impression d'ombre, et donc de relief.



FIGURE 3.6 – Représentation de la forêt dans les cartes de Cassini

La représentation des toponymes. Les toponymes de la carte de Cassini sont particuliers non seulement par leur omniprésence dans les cartes, mais aussi par la typographie, très évocatrice des cartes anciennes. Les toponymes indiquent tous les noms des éléments importants du paysage : villes, villages, lieux religieux, forêts, hydrographie ou encore des sommets. La typographie des cartes de Cassini est assez similaire à celle utilisée dans les cartes de l'époque : une typographie à empattements, élégante, lisible, noire et marquée. Les toponymes sont hiérarchisés selon ce qu'ils représentent : les villes sont écrites en capitales, les bourgs en grosses romaines, les paroisses et abbayes sont écrits en romaines plus petites, et les autres éléments comme les petites localités ou encore les chapelles, moulins, etc. sont écrits en italiques. L'analyse de la typographie n'a cependant pas pu être poussée plus loin, par manque de temps. Concernant leur placement, les toponymes sont généralement disposés à l'horizontale pour les noms de lieux, mais ils peuvent suivre l'orientation des forêts ou cours d'eau qu'ils représentent.

Chacune des caractéristiques visuelles identifiées pose un problème de représentation différent, que ce soit la question de la "bonne" géométrie sur laquelle appliquer une stylisation, ou la question du type d'outil de dessin à utiliser (des patches à appliquer ou du dessin vectoriel). Les caractéristiques visuelles décrites

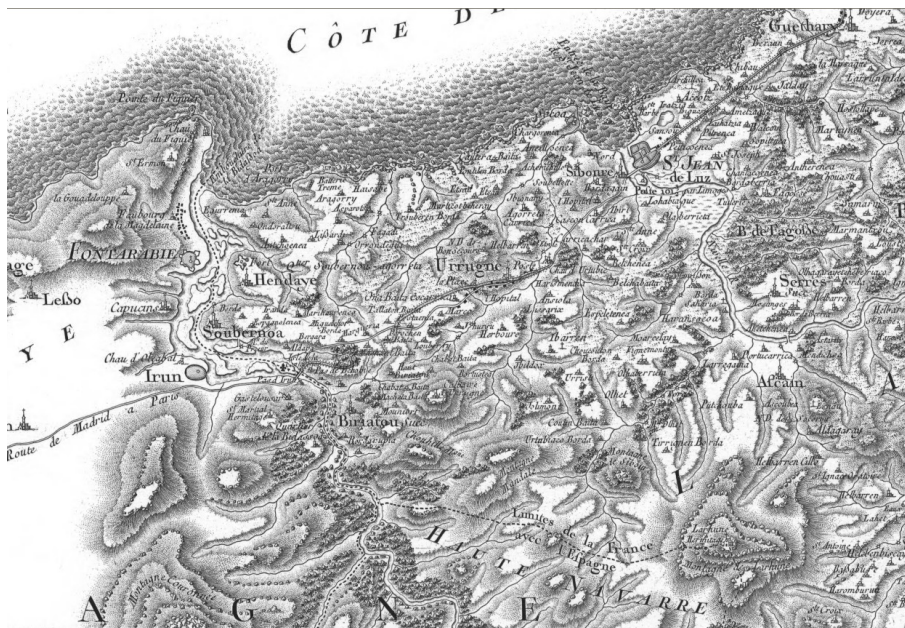


FIGURE 3.7 – Représentation des toponymes dans les cartes de Cassini

ici sont celles qu'on ne peut pas reproduire avec les outils existants dans un SIG. La représentation du relief nécessite de plus amples recherches pour déterminer la meilleure géométrie sur laquelle appliquer le dessin des hachures.

Spécification aquarelle

Les propriétés visuelles des aquarelles, i.e. des couleurs brillantes, des variations légères de couleurs et de visibilité de la texture du papier et les effets de dilution et d'absorption par le papier, sont le résultat d'une interaction complexe entre l'eau, les pigments de couleur, et le papier support. Outre son aspect purement artistique et esthétique, maîtriser l'aquarellisation en cartographie permettrait de rendre saillants certains objets (tracés plus précis, objets plus saillants) par rapport à des objets aquarellisés (contours flous, contenus dilués), ou, presque au contraire de donner un sens particulier aux objets aquarellisés : notre hypothèse est que l'aquarellisation permettrait de mettre en évidence des imprécisions et incertitudes sur les données acquises ou mesurées, les représentations et les phénomènes représentés. En ce sens, dans les cadres applicatifs qui l'intéressaient, J. Thollot décrivait que l'aquarelle permettrait de "souligner l'aspect hypothétique des choix d'architecture effectués (et accessoirement de ménager les susceptibilités des archéologues auteurs des deux interprétations)" (Thollot, 2008)...

La figure 3.8 présente un extrait sur Boston de l'aquarellisation de Stamen : on observe différents niveaux d'aquarellisation nécessaires pour préserver à la fois l'effet aquarelle et le rendu du réseau routier de la ville⁷.

Notre objectif initial dans le cadre du projet était d'adapter l'algorithme d'aquarellisation de (Bousseau et al., 2006) au cas particulier de la carte topographique et de se poser des questions sur le niveau de généralisation requis des données cartographiques en entrée, et du niveau d'aquarellisation pouvant être variable selon les données (par couche ou par ensemble d'objets). L'approche de (Bousseau et al., 2006) est de proposer un ensemble de techniques permettant de reproduire les propriétés visuelles de l'aquarelle et non une reproduction des propriétés physiques déjà largement décrites et implémentées dans (Curtis et al., 1997). La méthode permet à un utilisateur de manipuler des images ou des modèles 3D dans un pipeline commun en deux étapes : une étape d'abstraction qui génère des régions colorées uniformes (par segmentation) et une étape d'effets aquarelle (effets du papier, assombrissement des contours, variation de la densité des pigments en jouant sur le grain du papier) qui filtre l'image abstraite pour obtenir une image aquarellisée. Charlotte Hoarau a réalisé de premiers tests d'aquarellisation sur une carte au 1 :25000 style IGN issue de (Hoarau, 2011) (Cf. Figure 3.9) : avec cet algorithme, l'aquarellisation est globale sur

7. Stamen Design ne propose pas à l'utilisateur de contrôler l'aquarelle : on peut par flux WMS accéder à un fond mondial aquarellisé (toutes les couches sont aquarellisées) ou acheter des posters plus travaillés comme celui de Boston.



FIGURE 3.8 – Visualisation OSM Boston par Stamen Design, mode OSM ou mode poster avec aquarellisation différentielle.

l'image en entrée. On observe différents problèmes classiques de 'sur-généralisation' (suppression d'objets les plus petits et les plus fins, amplification des plus gros objets entraînant une superposition avec les voisins, etc.) : par exemple, les routes blanches sont perdues lors de l'aquarellisation (diluées...). Une telle aquarellisation globale peut être réalisée sur une carte plutôt déjà sur-généralisée pour le niveau d'échelle considéré.



FIGURE 3.9 – Carte de référence et carte aquarellisée (mode total mais les petites routes ont disparu)

Une autre approche consiste à considérer une aquarellisation différentielle selon les données cartographiques. Par exemple, végétation et mer peuvent être aquarellisées, alors qu'une très légère aquarellisation doit être proposée pour les routes et les bâtiments, pour conserver l'information topographique. L'idée du différentiel, en fonction de l'implantation, de la taille et de la forme des objets géographiques, est de pouvoir laisser la main à l'utilisateur pour paramétrer son propre niveau d'aquarellisation, selon ce qu'il souhaite rendre saillant et plus ou moins précis visuellement.

Ces objectifs génèrent deux catégories de problèmes :

- Simplifier avant d'appliquer une technique de rendu expressif, ce qui revient à généraliser les données avant d'aquarelliser : le problème de cartographie consiste ici à choisir les couches d'objets à généraliser selon leurs contextes ou de choisir à un niveau d'échelle inférieur pour sur-généraliser les données.
- Aquarelliser au niveau de généralisation donné : le problème ici est d'être capable de contrôler le niveau de stylisation pour ne pas altérer les données cartographiques (quoique certaines superpositions peuvent éventuellement être tolérées...selon l'usage), et donc éventuellement différencier les niveaux d'aquarellisation des objets.

Nous choisissons de pouvoir reproduire les effets proposés par (Bousseau et al., 2006), et pouvoir gérer les effets de façon différentielle selon les couches de données concernées.

Derain

Le tableau utilisé dans le cadre de ma thèse de doctorat est difficile à approcher en termes de style à reproduire dans la carte, car il ne s’agit pas uniquement d’une palette de couleurs à utiliser et à appliquer dans des aplats surfaciques de la carte. Il s’agit d’un ensemble de techniques à reproduire, en particulier sur la manipulation des coups de pinceaux et des effets de dilution. Dans un premier temps, nous avons cherché à identifier à la main les caractéristiques de ces coups de pinceaux dans l’objectif de les appliquer automatiquement sur les données : cela nécessite de décrire finement les paramètres dont on a besoin.



FIGURE 3.10 – Derain

Une première approche a été de considérer le lien entre objets du tableau et objets dans la carte et de conserver la nature des relations sémantiques du tableau pour les appliquer dans la carte, avec un paramétrage commun entre les objets du tableau et les objets de la carte :

- trait de côte et/ou réseau hydro <-> trait noir de la ligne de crête [courbure, épaisseur]
- réseau routier <-> troncs et branches [couleur, sinuosité, épaisseur]
- feuilles <-> bâtis [forme, épaisseur, couleur (varie localement), orientation fonction de l’orientation du tronc et des branches des coups de pinceaux, espacement]
- végétation <-> prairie au premier plan [couleur, forme, orientation des coups de pinceaux]
- réseau hydro <-> chemin [couleur violet, orientation, forme, épaisseur des coups de pinceaux]

Nous avons utilisé une approche modélisation du coup de pinceau proposé par un de nos partenaires, David Vanderhaeghe (Vanderhaeghe, 2008; Vanderhaeghe and Collomosse, 2013), où il est nécessaire de décrire les paramètres précisément du modèle. L’utilisation d’un tableau de Derain va nous permettre ensuite de valider le paramétrage et l’expressivité du modèle de coup de pinceau implémenté.

3.2.2 Positionnement du projet MapStyle : extension des normes de représentation et implémentation de méthodes de rendu expressif

La figure 3.11 présente le positionnement du projet ANR MapStyle, et le pipeline de rendu mis en œuvre sur la plateforme GeOxygene du COGIT. En entrée, nous manipulons des données cartographiques (déjà généralisées pour l’échelle de représentation visée), dont la légende a également été préalablement structurée (les thèmes géographiques et leurs relations sémantiques sont donc préalablement définis). L’étape 1 consiste à spécifier le style attendu, à l’aide de variables visuelles qui peuvent être instanciées selon le besoin (respect de la légende, style visé) : il s’agit donc de décrire comment les géométries vont être rendues. L’étape 2 consiste, pour le moteur de rendu, à lire la spécification du style pour rendre effectivement les géométries en entrée, à l’aide des méthodes de rendu adaptées. L’étape 3 consiste à visualiser dans une interface la carte produite (pour évaluation, utilisation, manipulation future).

Le verrou technique dans le projet est de préciser le modèle de style choisi, ainsi qu’un formalisme associé, et de viser la séparation entre la description d’un style et son rendu effectif.

Visant l’interopérabilité, nous nous intéressons tout particulièrement aux normes de représentation graphique existantes, les normes *Styled Layer Descriptor* (SLD), correspondant à la description de la couche de données, et *Symbology Encoding* (SE), correspondant au choix des paramètres graphiques à

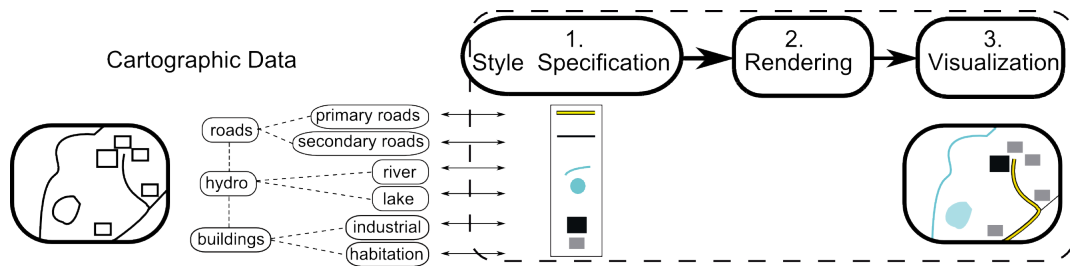


FIGURE 3.11 – Pipeline de rendu mis en œuvre dans le cadre du projet MapStyle, GeOxygene. (Christophe et al., 2016)

instancier. Ces normes ont été établies dans le contexte des Web services, afin de transférer la représentation graphique associée aux données. Le formalisme du fichier *sld*, XML-like, se lit sous la forme d'un arbre décomposé en couches de données géographiques, pour lesquelles on explicite le type de *Symbolizer* associé à la donnée, en fonction de son type d'implantation, un ensemble de règles et de filtres possibles sur la représentation, puis les différents paramètres et leurs valeurs (CSS-like). Nous nous appuyons sur ce modèle de style, décomposé en deux normes ou spécifications de la représentation graphique. Ces normes sont implémentées dans les différents logiciels SIG ou serveurs cartographiques présents sur le marché : ces logiciels ne permettent pas de décrire l'utilisation de méthodes de rendu plus sophistiquées que ce que nous avons classiquement en SIG. L'objectif central du projet a donc été de proposer une extension des normes de représentation, et une implémentation des techniques de rendu associées, afin de pouvoir proposer du rendu expressif en cartographie.

Méthodes de rendu Des méthodes de rendu expressif peuvent être intégrées au pipeline de rendu cartographique (en haut de la figure 3.12), comme des services spécialisés, appelés *méthodes expressives*, qui seront exécutées par le moteur de rendu du SIG. Nous définissons une méthode de rendu comme un service qui applique une technique de rendu expressif à un ensemble de données 2D en entrée. Une telle méthode est associée à un ensemble de paramètres auxquels l'utilisateur doit pouvoir accéder. Ces méthodes de rendu doivent être spécifiables et contrôlables dans un fichier de style, afin que la description du style soit générique et indépendante des données.

Descripteurs de méthodes de rendu Notre proposition consiste à définir des métadonnées qui fonctionnent comme une interface entre la description du style et le service lui-même (en bas de la figure 3.12, encadré en rouge). Le fichier de métadonnées d'une méthode expressive a les propriétés suivantes : la description de chacun de ses paramètres et la façon d'appeler le service, e.g. le nom de la méthode.

Extension SE pour le rendu expressif Ces services vont être paramétrés par l'utilisateur avec de *nouveaux éléments de stylisation (Symbolizers)* ajoutés à la norme SE. Afin d'augmenter les capacités de rendu de la stylisation des lignes et des surfaces, nous avons proposé de pouvoir appeler des méthodes expressives dans des éléments de symbolisation dédiés à la stylisation linéaire (*LineSymbolizer*) et surfacique (*PolygonSymbolizer*). Tous deux définissent un sous-élément *Stroke* dédié à la représentation des entités linéaires et des contours des entités surfaciques. L'intérieur d'un polygone est décrit par le sous-élément *Fill*. Ses deux sous-éléments ont une liste pré-définie de paramètres dans SE qui nécessitent d'être étendus pour la déclaration de méthodes expressives. *Fill* et *Stroke* sont donc étendus en *ExpressiveFill* et *ExpressiveStroke*. Un nouvel élément *Expressive* contient une référence à la méthode expressive (son nom) et les valeurs de ses paramètres nécessaires à l'exécution de la méthode.

Extension SLD pour le rendu expressif Afin de permettre le contrôle du rendu de chaque couche, nous avons également proposé des *extensions à la spécification SLD*. La spécification SLD est étendue par deux éléments. Nous avons ajouté la possibilité de définir un arrière-plan (*Background*) au plus haut niveau du fichier de style. Le *Background* est défini comme une texture tuilée prédéfinie ou procédurale. Nous avons aussi amélioré le contrôle sur le rendu à chaque couche en ajoutant des *LayerFilters* pour contrôler le contraste et la luminosité.

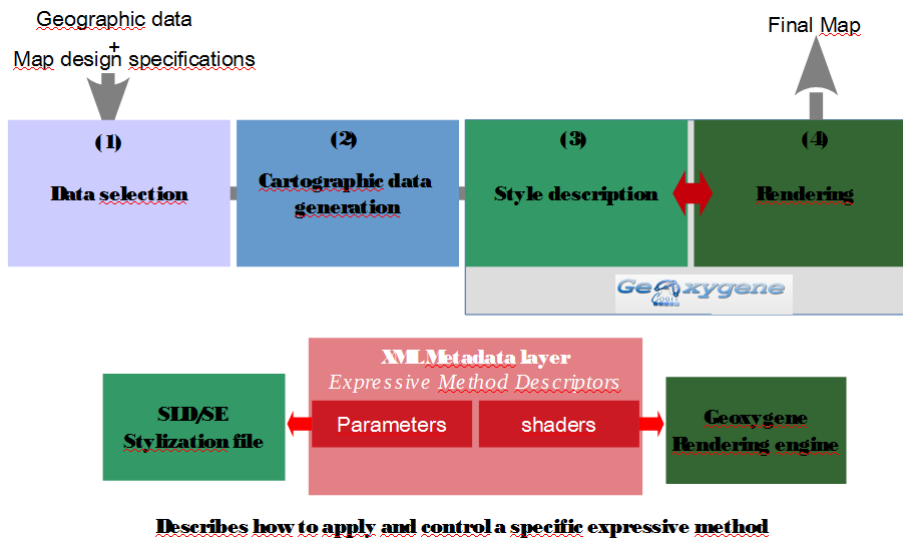


FIGURE 3.12 – Métadonnées de description des méthodes de rendu (Descripteur des méthodes de rendu), interface entre la description du style et les méthodes de rendu (Christophe et al., 2016; Duménieu and Christophe, 2016).

Implémentation des méthodes de rendu L’implémentation des techniques de rendu a été réalisée par les partenaires du projet (IRIT, INRIA). Trois types d’approche ont été développées : la stylisation linéaire et la génération de textures raster pour le remplissage des surfaces (Christophe et al., 2016) sont présentées ci-dessous. La génération de textures vectorielles dans le cadre la thèse d’Hugo Loi (Loi et al., 2013; Loi, 2015; Christophe et al., 2017a) est présenté dans la section 3.2.4.

Le papier NPAR’16 (Christophe et al., 2016) présente ces trois approches, que je reprends ici. Les fichiers SLD associés sont donnés dans le supplemental du papier NPAR’16.

Stylisation linéaire *Cette partie a été implémentée par Jérémie Turbet et David Vanderhaeghe (IRIT) puis repris par Nicolas Mellado, post-doc IRIT. Les méthodes de stylisation linéaire ont été implémentées sur la plateforme GeOxygene opensource du COGIT. B. Duménieu post-doc COGIT a participé à l’intégration et la maintenance de ces développements. J’explícite ici la démarche utilisée par David Vanderhaeghe (IRIT) et décrite dans le papier NPAR’16.*

le contrôle de la paramétrisation de la stylisation d’une géométrie de type polyligne manquent dans la modélisation de la norme SE actuellement. L’implémentation proposée est basée sur l’interaction entre le papier (le fond) et l’outil de dessin. Le principe de la méthode est le suivant : l’implémentation utilise le squelette de ce linéaire (axe médian), qui doit être orienté et paramétré. Styliser consiste à calculer quelle est la région couverte par le rendu final de la ligne et à calculer la couleur de chacun des pixels couverts par cette région. Pour faire ce calcul, un ensemble de paramètres a été défini permettant de reproduire plusieurs styles de ligne. Cette méthode nécessite deux étapes représentées sur la figure 3.13 : la génération d’une géométrie spécifique, sous la forme d’une tessellation de chaque polyligne (a à b), et le calcul de la couleur le long de cette géométrie : la couleur finale dépend de la pression exercée par l’outil et de la forme de l’outil qui peuvent varier le long du linéaire (le calcul de la couleur du rendu final se fait localement pour un pixel, les pixels voisins n’ont pas d’influence. Un pixel du rendu final est défini par sa position paramétrique en u le long du squelette, et en v perpendiculairement au squelette.). Pour augmenter les possibilités de rendu, on peut contrôler la géométrie de la ligne en jouant sur sa paramétrisation (u,v). Un exemple typique est de faire varier la pression et l’épaisseur le long de la ligne pour marquer le début et la fin du tracé.

Comme les linéaires en entrée peuvent être de tailles variables, afin d’éviter d’avoir des effets d’étirement de la texture, nous utilisons un mécanisme de répétition de la texture, la texture est découpée en trois blocs, i.e. le début, le milieu (qui se répète) et la fin. La méthode de stylisation linéaire peut ainsi être paramétrée par l’ensemble de paramètres suivants :

- *width* : taille de la polyligne ;
- *texture* : un ensemble de trois textures, *début*, *milieu* and *fin* ;

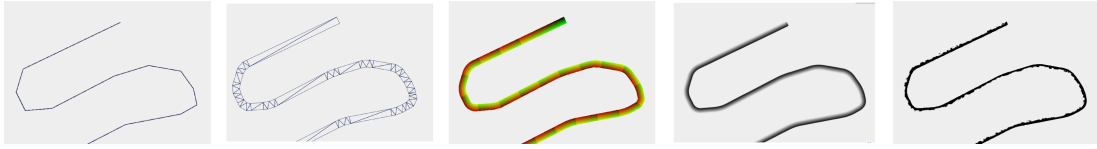


FIGURE 3.13 – Stylisation linéaire : polygône en entrée (a), tessellation (b), coordonnées de texture (c), application de la texture (d), calcul de la couleur avec un shader spécifique (e) (Christophe et al., 2016).

- *paper* : une texture de papier ;
- *pressure strength* : un facteur d'échelle pour accentuer la pression définie par la texture ;
- *paper strength* : un facteur d'échelle pour accentuer le papier ;
- *smoothness* : un paramètre pour calculer la transparence de couleur en fonction de la pénétration ;
- *jigglng* : jiggle texture selon le bruit ;
- *width variation* : épaisseur variable selon le bruit.

La figure 3.14 montre différents exemples pouvant être obtenus, en faisant varier la pression, l'influence du papier et l'épaisseur des traits. En modifiant la texture utilisée en entrée, on peut également fortement jouer sur l'apparence de la ligne.

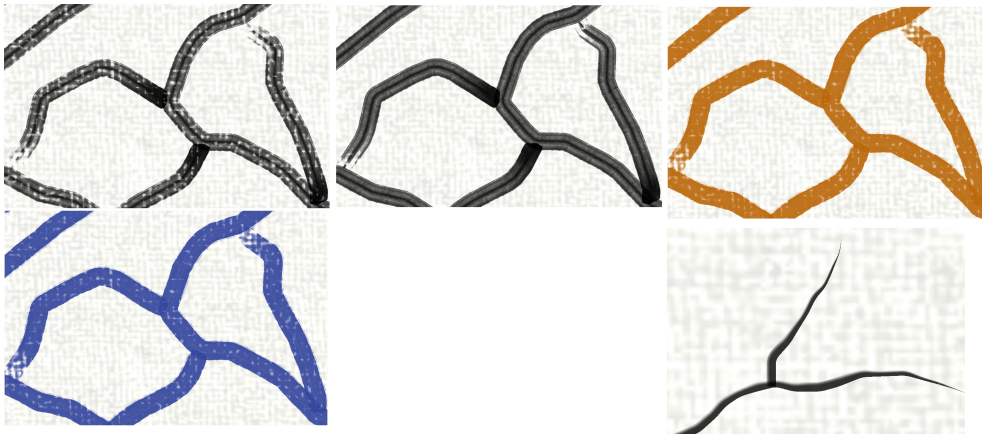


FIGURE 3.14 – Variations sur la stylisation linéaire (Christophe et al., 2016; Duménieu and Christophe, 2016).

Pour valider cette proposition, B. Duménieu a effectué la saisie des données d'un tableau de Derain sur la plateforme GeOxygene, et réalisé une stylisation des linéaires afin de représenter le tableau en entrée : le résultat est efficace et permet de valider la proximité du résultat final avec l'image initiale, ainsi que de mettre en évidence comment données et rendu se contraignent mutuellement (Figure 3.15).

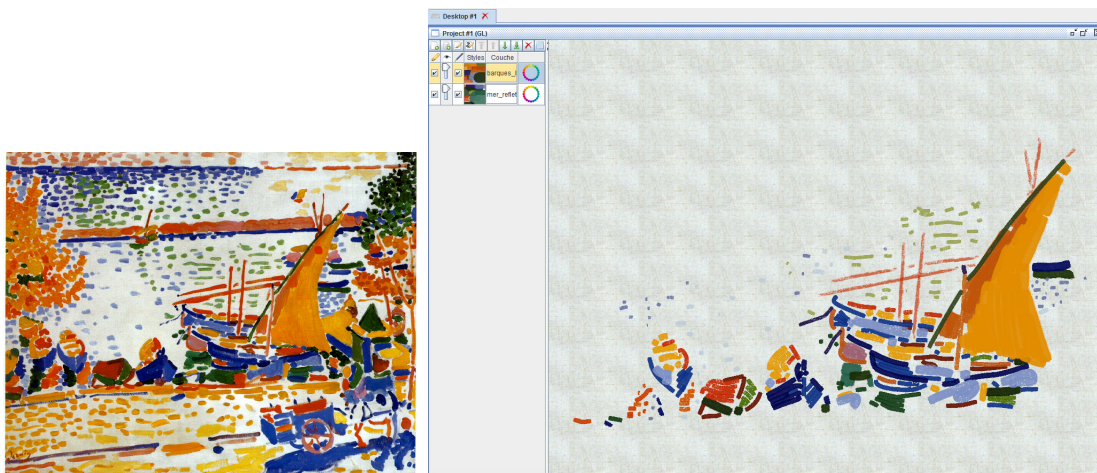


FIGURE 3.15 – Validation inverse des outils de stylisation sur GeOxygene.

D'autres approches avec d'autres ensembles de paramètres peuvent être considérées pour calculer cette stylisation linéaire (Trapp et al., 2015).

Génération de textures raster pour le remplissage des surfaces *Cette partie a été implémentée par Jérémie Turbet, ingénieur de recherche IRIT puis repris par Nicolas Mellado, post-doc IRIT, tous deux encadrés par David Vanderhaeghe. Les méthodes de stylisation linéaire ont été implémentées sur la plateforme GeOxygene opensource du COGIT. B. Duménieu post-doc COGIT a participé à l'intégration et la maintenance de ces développements. J'explicité ici la démarche utilisée par David Vanderhaeghe (IRIT) et décrite dans le papier NPAR'16.*

Dans les cartes, le remplissage des surfaces par des textures est très continu et le tuilage entre éléments de textures n'est pas visible. La méthode proposée consiste à distribuer et assembler des extraits de l'image source, sous forme de petits patches représentant des éléments de texture qui sont plus ou moins répétés pour remplir une zone⁸. Les patches sont distribués dans la surface à remplir selon une probabilité définie par l'utilisateur : la probabilité de sélectionner un patch donné et ses paramètres (taille, position) est définie par une fonction, comme un champ de distance par exemple. La façon dont les patches sont assemblés joue un rôle important dans le résultat visuel final : deux approches ont été implémentées, alpha blending et graph cut blending Kwatra et al. (2003), permettant respectivement d'atténuer les transitions entre patches, ou de préserver le contraste.

La méthode de remplissage par patches peut donc être paramétrée par l'ensemble de paramètres suivants :

- un ensemble de patches, identifiés par leur nom et une image ;
- pour chaque patch, une probabilité de sélection, pouvant être contrainte par une distance donnée ;
- la sélection d'une fonction de distance : une distance au bord ;
- la sélection d'une fonction d'orientation : perpendiculaire ou parallèle au bord orienté dans l'espace image ;
- une technique d'assemblage : alpha blending ou graph cut.

Ces deux techniques de rendu, stylisation linéaire et remplissage de surface par patches, sont deux exemples de services pouvant être contrôlés par l'extension de la norme SE. D'autres services pourraient être ajoutés, à partir du moment où un ensemble de paramètres contrôlables peut être décrit dans le fichier de style.

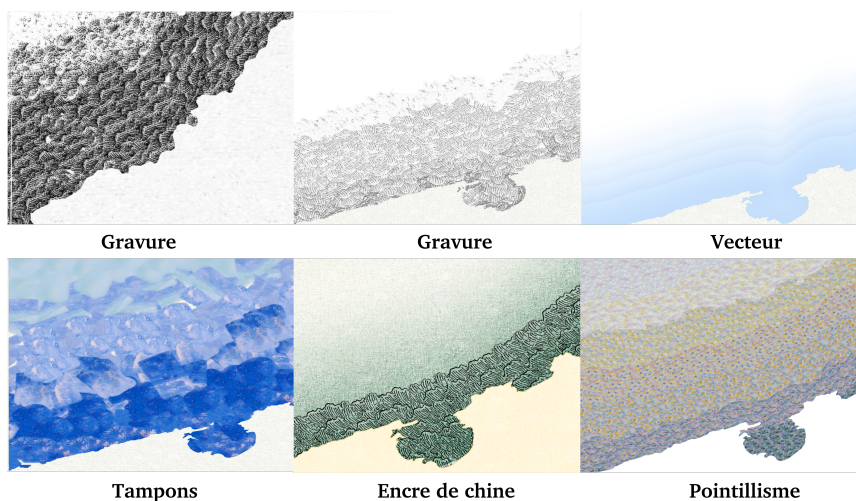


FIGURE 3.16 – Variations sur le remplissage de surfaces par patches extraits dans différentes sources d'inspiration (Cassini, peinture, dessin à la main, etc.) (Christophe et al., 2016; Duménieu and Christophe, 2016).

⁸. Les patches sont extraits manuellement dans l'image source. Leur nombre et leur taille vont influencer le résultat cartographique.

3.2.3 Conception de cartes "à la manière de"

Les cartes construites par le projet, à partir de l'ensemble des fichiers de style et méthodes de rendu associées qui ont été développées sont les suivantes :

- un style Cassini : la figure 3.17 met en évidence une incrustation d'une carte produite sur des données anciennes auxquelles le style Cassini a été appliqué : ce montage sert plutôt à valider la qualité de la reproduction du style (objectif purement interne de validation). La figure 3.18 montre l'application du même style à des données cartographiques contemporaines au 100K.
- un style estampe : la figure 3.19 présente les premiers essais d'estampe, ayant en fait démarrés comme une colorisation du style Cassini en noir et blanc. La figure 3.20 présente un résultat particulièrement travaillé automatiquement (stylistation) et à la main (sélection de données). Une vidéo de cette carte où la montée des eaux est animée est visible sur le lien suivant : .
- un style aquarelle : la figure 3.21 montre ici une aquarellisation de données cartographiques au 100K (végétation, mer et sables côtiers sont aquarellisés, les routes sont stylisées style encre de Chine).



FIGURE 3.17 – Carte de Cassini vs. style Cassini sur données anciennes (Bertrand Duménieu).



FIGURE 3.18 – Style Cassini sur données cartographiques au 100K (Bertrand Duméniou).



FIGURE 3.19 – Premiers essais d'estampe, données 100K, Saint Jean de Luz (Bertrand Duméniou).



FIGURE 3.20 – Estampe japonaise et stylisation de la mer (Bertrand Duméniou, Antoine Masse).

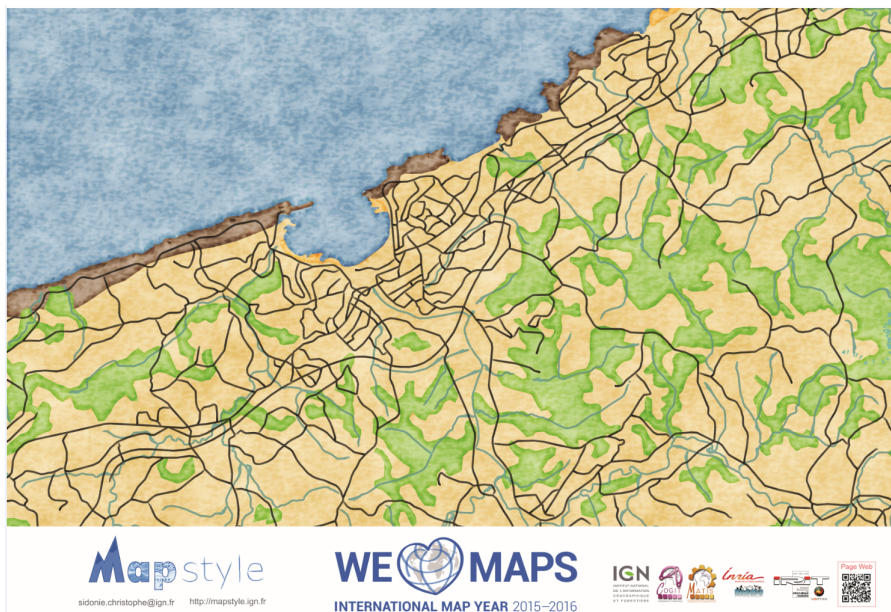


FIGURE 3.21 – Aquarellisation, données 100K, Saint Jean de Luz

3.2.4 Le cas de la représentation des zones rocheuses dans les cartes de montagne : génération de textures vectorielles

Cette partie a fait l'objet de la thèse de doctorat d'Hugo Loi financée par l'ANR dans le cadre du projet, dirigée par Joëlle Thollot, Thomas Hurtut et Romain Vergne. Avec Mathieu Brédif (IGN/MATIS) et François Lecordix (IGNFab), nous avons apporté l'expertise IGN sur la thèse d'Hugo Loi dans sa partie applicative en cartographie des zones rocheuses en montagne. Jérémie Ory a participé à la saisie des données cartographiques en entrée, Mathieu Brédif a développé un outil de stylisation spécifique. L'approche proposée dans la thèse a été développée dans un outil indépendant en Python/CGAL. La partie application à la cartographie a fait l'objet d'une présentation à la conférence Temps, Art et Cartographie 2016, et d'une soumission à l'ICC2017 (Christophe et al., 2017b), mais n'a pas encore fait l'objet d'une publication longue en cartographie : ce pour quoi, je détaille la démarche ici.

Le dessin des cartes de montagne, en particulier celles au 1 :10000, a longtemps été fait à la main à l'IGN, puis scanné pour être réutilisé ensuite dans les chaînes de production automatique. Ainsi, le dessin des rochers dans la carte au 1 :10000 de l'Aiguille du Moine est issu du savoir-faire et de la patience d'artistes cartographes, souvent à partir d'images obliques, permettant de percevoir les différentes structures du relief (pentes, illumination, arêtes, cols, etc.) et donnant à voir les obstacles infranchissables. Actuellement, en particulier à cause du recul des glaciers, il est nécessaire de mettre à jour les données et les représentations des zones de montagnes et leurs différentes occupations du sol (éboulis, rochers, etc.). Cependant, d'une part, le dessin à la main très coûteux en temps ne se pratique plus, d'autre part, les outils de cartographie ou de dessin vectoriel ne permettent pas de générer automatiquement des textures adaptées à la représentation du rocher dans les cartes de montagne. Nous avons visé à fournir une méthode automatique de génération de textures vectorielles pour la représentation graphique des rochers, dans le style topographique de la carte au 1 :10000 de l'IGN. La difficulté majeure que nous avons rencontrée est l'identification des connaissances nécessaires à la reproduction de ce style expressif de rocher. Nous avons donc cherché à recueillir les pratiques des cartographes de l'IGN, à l'aide d'entretiens, pour réaliser ce type de rendu : il existe des règles pour le dessin du relief, influencées également par le cartographe lui-même. Nous avons alors déterminé les caractéristiques graphiques du dessin du rocher à générer, en analysant dans la carte initiale, les textures utilisées pour dessiner un objet géographique (thalwegs, infractuosités, ruptures de pente, etc.) ou celles utilisées pour accentuer des propriétés du relief (pente, dangerosité, etc.). Un travail similaire a été réalisé pour le rendu du rocher très différent dans le style des cartes topographiques suisses (Hurni et al., 2001; Jenny et al., 2014; Geisthovel R., 2015).

Dans le domaine artistique, la notion de *texture* fait référence à un motif répétitif servant à recouvrir une surface. L'objectif dans le cadre générique de la thèse d'Hugo Loi est de générer des *éléments de textures*, i.e. *motifs composés de petits éléments géométriques* (Loi, 2015). Son problème consiste donc à arranger des éléments spatialement pour remplir une surface donnée : la conception d'arrangements est très importante dans la conception d'éléments de textures puisqu'elle décrit le contenu géométrique de la texture. Un deuxième objectif d'Hugo Loi est de faciliter la tâche (répétitive) des artistes professionnels en proposant une approche permettant de réaliser des essais et de générer un résultat rapidement. Dans le cadre générique, Hugo Loi a visé à obtenir des arrangements stationnaires (les statistiques spatiales d'un arrangement restent les mêmes, quelque soit la position spatiale), dans le cadre spécifique, celui du dessin des zones rocheuses, ces arrangements seront localement répétitifs mais varieront spatialement légèrement, influencés par des données externes (pente, ensoleillement, altitude, etc.).

La solution proposée par Hugo Loi dans sa thèse, est une approche programmable de génération de textures vectorielles. Dans une approche programmable, la tâche de l'utilisateur consiste à lui faire construire l'algorithme qui va générer le résultat attendu. Contrairement à une approche par l'exemple, ce type d'approche permet d'obtenir plus de précision et plus de flexibilité, plus adaptée à un contexte de spécification et design de textures. L'utilisateur dispose de trois types d'opérateurs : des opérateurs de partitionnement (*partitioning*) pour initialiser un arrangement, des opérateurs de *mapping* pour affiner cet arrangement, et des opérateurs de fusion (*merging*) pour créer des combinaisons d'arrangements. La figure 3.22 présente le principe de combinaisons d'arrangements de motifs pour obtenir des arrangements plus complexes : les arrangements (a), (b), (c) sont issus d'un partitionnement (grille droite, alvéoles, etc.) suivi d'un *mapping* (par exemple, mettre un petit carré dans chaque face de la partition) ; l'arrangement (d) est obtenu par l'union de (a) et (b) ; les arrangements (f) et (g) proviennent d'un opérateur *Inside* se comportant comme un masque, conservant seulement les arêtes qui sont dans les faces du second arrangement ; les arrangements (h) et (i) proviennent d'un opérateur *Outside* qui conserve seulement les

arêtes qui sont à l'extérieur des faces du second arrangement, avec des options sur la gestion des bords (*CROP*, *KEEP_OUTSIDE*, etc.).

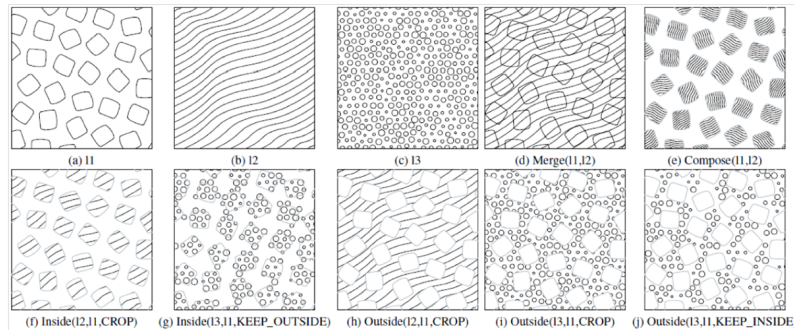


FIGURE 3.22 – Principes de l'approche par combinaison de motifs (Loi et al., 2013; Loi, 2015)

En termes d'interaction, l'approche consiste à éditer un script Python, à l'aide d'une liste d'opérateurs, et favorise un processus de conception itératif, tout en permettant l'exploration de combinaisons variées (Cf. Figure 3.23). Dans le contexte cartographique, tout l'enjeu est de résoudre l'écart entre une texture abstraite et une région texturée dans une carte : ce type d'approche permet déjà de remplir des surfaces, par exemple de végétation, afin d'automatiser et de contrôler les textures d'occupation du sol, selon des motifs et des distributions variés en entrée, données et règles étant fournies par les chercheurs IGN (Cf. Figure 3.24). Une première étape de validation a consisté à avoir une démarche exploratoire et tester l'expressivité de l'approche. Une deuxième approche a consisté en une expérimentation utilisateur : 45 minutes de tutoriel suivies d'une période de pratique visant à reproduire un ensemble d'arrangements. Les résultats et les scripts sont fournis dans le mémoire de thèse d'Hugo Loi (Loi, 2015).

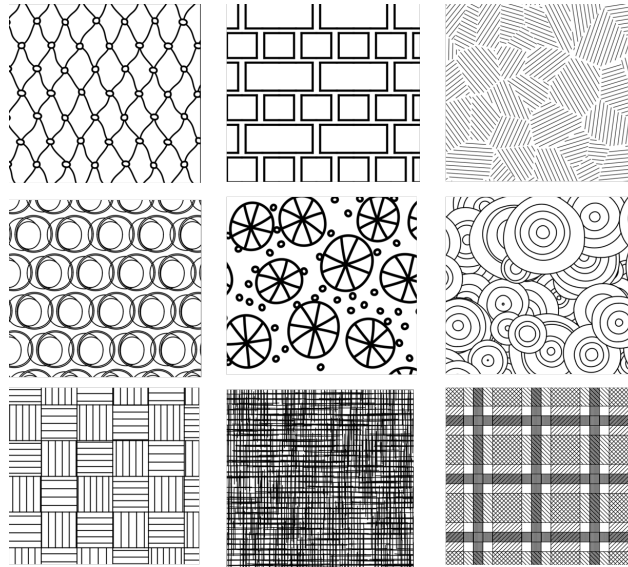


FIGURE 3.23 – Génération de textures vectorielles (Loi et al., 2013; Loi, 2015)

Dans le contexte spécifique du dessin des zones rocheuses en montagne, la description du problème est plus complexe, puisqu'il s'agit de trouver la bonne texture pour aider l'utilisateur à percevoir la morphologie complexe du relief (multi-échelles), tout en ne percevant pas nécessairement les textures elles-mêmes. Les textures en hachures représentant les zones rocheuses sont des textures qui varient spatialement (*spatially-varying textures*) : leur densité et leur orientation varient dans la carte. La texture va donc devoir être influencée par des contraintes géographiques (pente locale, orientation, etc.) et cartographiques (expressivité). En termes d'implémentation, il a été nécessaire de développer une extension à la méthode de conception afin de pouvoir définir des *control fields* permettant d'influencer la texture dans l'espace de représentation. L'objectif ici est de garantir un contrôle local, c'est-à-dire qu'une petite modification localisée du champ de contrôle doit produire uniquement des changements locaux dans l'arrangement final.



FIGURE 3.24 – Génération de textures vectorielles pour la végétation (Loi, 2015)

Notre travail côté IGN a donc été d'une part d'identifier les paramètres géographiques et cartographiques dans les cartes anciennement dessinées à la main (entretiens, analyses de cartes, etc.), afin de formaliser des règles, et de construire les données cartographiques nécessaires au processus de design : nous avons extrait, saisi et annoté manuellement le réseau de crêtes et de thalwegs⁹, suivi de l'identification de l'orientation des pentes et de l'ensoleillement dans chacune des facettes de la partition de l'espace construit à partir de notre réseau. Le travail d'Hugo Loi a été de développer une bonne fonction de transfert reliant ces informations au rendu de l'image en sortie. De nombreux échanges, et un avancement itératif ont eu lieu pour résoudre ces deux types de problèmes. De nombreux essais ont été effectués, certains sont donnés par la Figure 3.25 : un des premiers essais a été obtenu en conservant uniquement un axe dans une grille "tremblante" (jittered grid) (a). Ensuite, une distribution de triangles a été testée afin de marquer le contraste entre les faces sombres et claires (b). L'étape suivante a été de tester des variations de densité dans une face, en partitionnant la face et en appliquant des textures de hachures (c). Les formes triangulaires sur les arêtes principales ont été retouchées et redistribuées de façon plus aérées (d), et la densité a été re-équilibrée afin d'éviter un effet de clutter près de l'Aiguille (e). Les arêtes principales ont été réhaussées et une représentation des thalwegs a été rajoutée (réalisée par ailleurs) (f), et finalement, afin de rendre la rugosité du terrain, un hachurage bidirectionnel a été proposé (g).

A la sortie du script d'Hugo Loi, nous récupérons donc une couche de géométries "hachures". Mathieu Brédif (IGN/MATIS) a développé un outil de stylisation spécifique, prenant en entrée toute donnée cartographique : une stylisation est donc appliquée aux géométries fournies par Hugo, à partir d'une texture type encre de chine¹⁰. Les solutions cartographiques ont été proposées régulièrement à François Lecordix (IGNFab) pour validation (ou non). Les résultats présentés par la figure 3.26 sont satisfaisants, car ils permettent de percevoir correctement la morphologie du relief (ils sont zoomés afin qu'on puisse évaluer les distributions de textures). La vraie évaluation se fait sur la figure finale 3.27. Un compositing de la couche de texture des zones rocheuses stylisée a été réalisé avec les différents calques de la carte de l'Aiguille du Moine au 1/100000^e dans le logiciel QGIS, pour obtenir la carte de la figure 3.27 au 1/100000^e. Cette carte a été présentée lors de l'Exposition de cartes réalisée pendant les Journées Recherche IGN 2016, ainsi qu'à la conférence Temps, Art et Cartographie 2016¹¹ : les résultats ont été jugés comme étant très satisfaisants, puisque cette proposition de textures permet de percevoir la morphologie du relief et plusieurs niveaux hiérarchiques dans cette morphologie (pas uniquement une arête principale et des faces sombres/éclairées, mais plusieurs niveaux d'emboîtements d'arêtes), et ne pas focaliser sur les textures dessinées.

9. Les MNT même les plus détaillés ne permettent pas d'avoir un niveau de détail suffisant pour tenter de reproduire une zone de la carte au 1/100000^e.

10. <http://mathieu.bredif.com/mapstyle>

11. <https://art-carto-semio.sciencesconf.org/>

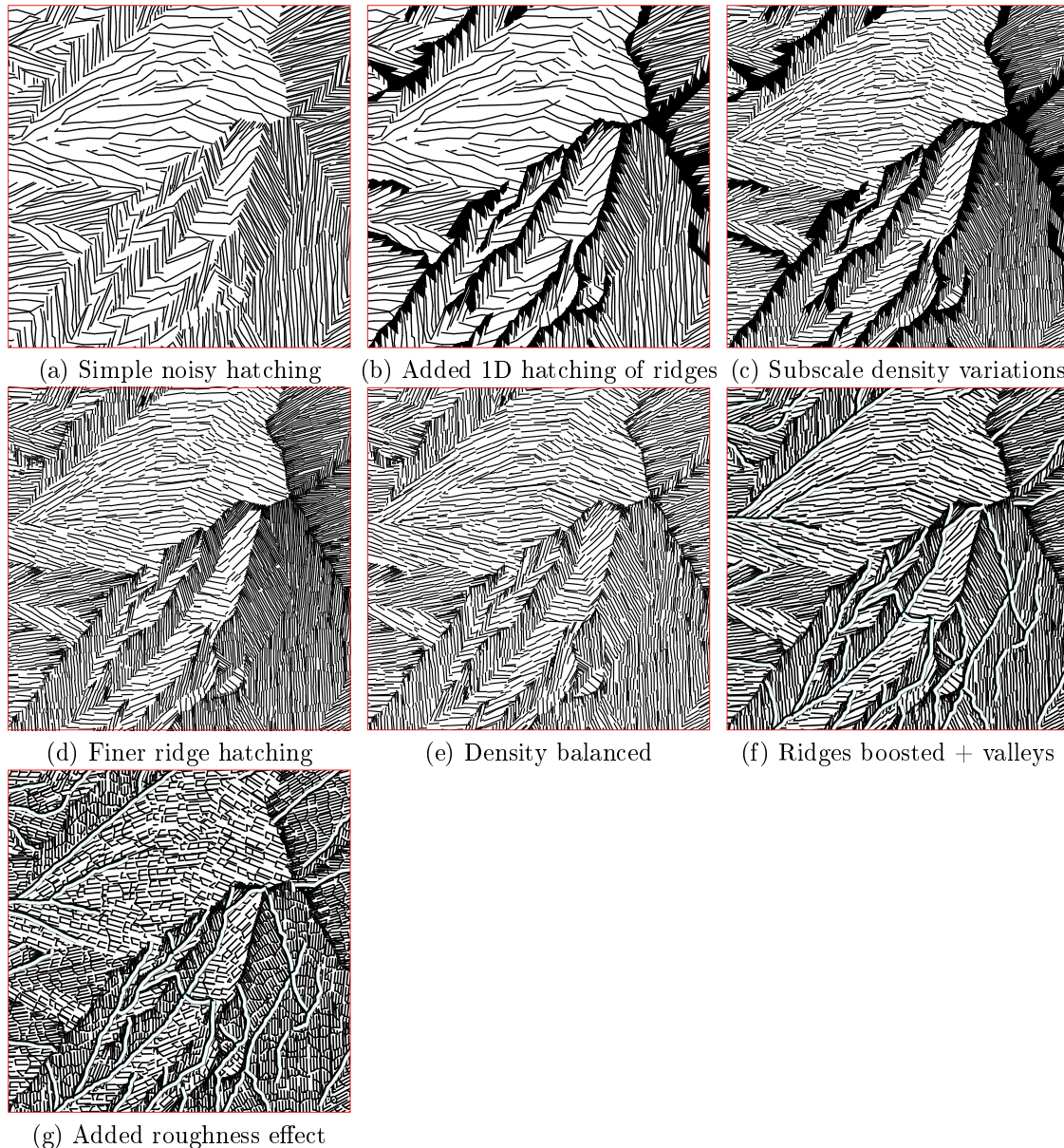


FIGURE 3.25 – Itérations majeures sur le design des textures (Loi, 2015).

3.3 Intégration visuelle de données géographiques hétérogènes

En termes de représentation graphique, un aspect important du problème est de considérer différentes données géographiques qui peuvent être visualisées ensemble (juxtaposées ou hybridées) pour obtenir des représentations plus efficaces. Deux problèmes se posent : le problème de l'hétérogénéité visuelle éventuelle des données géographiques manipulées (format, source, niveau de détail, échelle de représentation, etc.) et le problème du choix de style de rendu à appliquer à ces données pour fournir une cohérence visuelle facilitant la lecture et la compréhension des utilisateurs. En particulier, les grands paradigmes de représentation que sont l'abstraction et le photo-réalisme posent des questions quant au choix à réaliser pour représenter et visualiser des données géographiques ensemble. Ces deux grands styles de rendu permettent à l'utilisateur de réussir des tâches de cartographie ou de géo-visualisation, différemment selon les utilisateurs, les tâches et les contextes d'utilisation considérés. Il n'y a pas un style de rendu plus adapté pour un problème : encore une fois, nous faisons face à un problème d'adaptation des représentations qui doit se mettre en œuvre dans l'adaptation des processus de conception.

D'une part, il est important que nos systèmes de géo-visualisations soient capables de passer d'un style de rendu à un autre, à partir d'un ensemble de données géographiques hétérogènes, sur un même territoire, selon les usages et besoins des utilisateurs (section 3.3.1), d'autre part il est important de

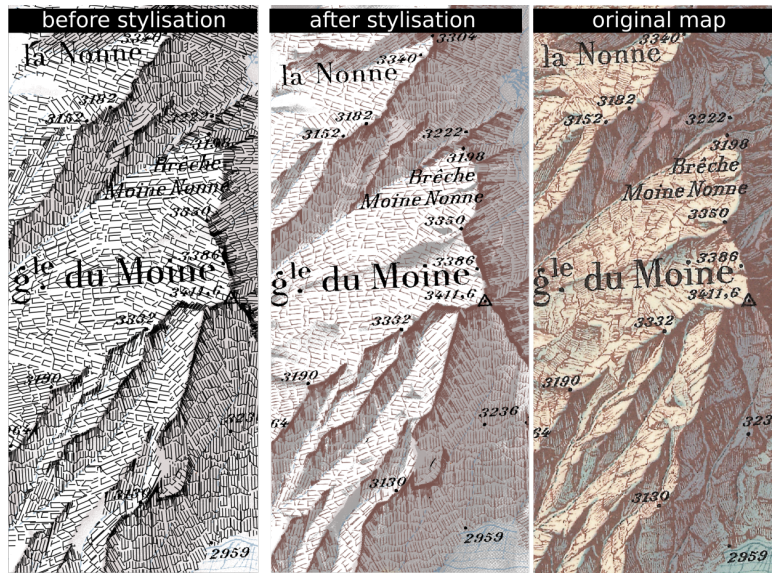


FIGURE 3.26 – Génération de textures vectorielles pour la montagne : 1)- génération d'éléments de textures (géométries), 2)- stylisation des éléments de textures, 3)- carte originale (Loi, 2015; Christophe et al., 2016).

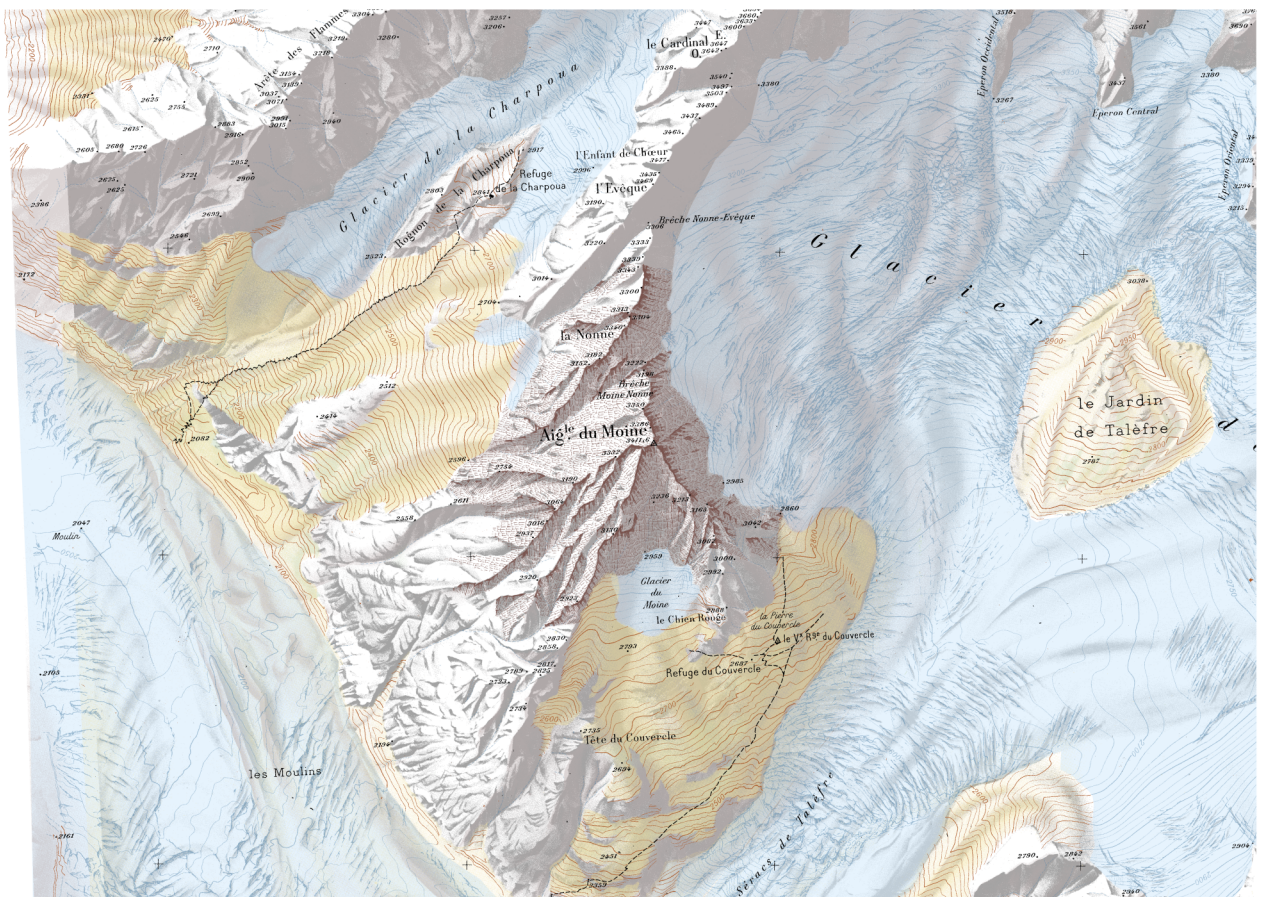


FIGURE 3.27 – Carte de l'Aiguille du Moine, 1/100000è, zones rocheuses dessinées automatiquement (Loi, 2015; Christophe et al., 2016).

pouvoir hybrider des représentations classiques afin de permettre aux utilisateurs de concevoir des co-visualisations de données vecteur et raster, par exemple (section 3.3.2) ou de pouvoir hybrider des

styles de rendu dans une même scène (section 3.3.3). Dans les trois types de travaux présentés dans cette section, notre objectif a été d’explorer les espaces de paramètres à disposition pour contrôler des styles topographiques abstraits à photo-réalistes et proposer des méthodes de conception pour gérer le paramétrage.

3.3.1 Géo-visualisations abstraites et photo-réalistes du littoral

Cette section présente les travaux de post-doctorat d’Antoine Masse que j’ai encadré de 2014 à 2016, dans le cadre du projet ANR MapStyle (Masse and Christophe, 2015a,b, 2016a,b). Je résume ici le papier de revue RIG (Masse and Christophe, 2016a) et les derniers résultats présentés au workshop AGILE’16 (Masse and Christophe, 2016b). Des états de l’art sur la géovisualisation du littoral et l’utilisation de données LiDAR en géovisualisation sont donnés dans ces papiers.

Afin d’augmenter les capacités de co-visualisation réaliste, qu’elle soit photo-réaliste ou non photo-réaliste (expressive), nous avons prévu de travailler dans le cadre du projet MapStyle, sur la géovisualisation de la zone littorale, afin d’y injecter différents résultats du projet (stylisation expressive et données géographiques hétérogènes). J’ai tout d’abord réalisé une analyse de besoins en cartographie et géovisualisation du littoral, suite à des entretiens avec Georges Dubois du SHOM, et dans le projet, nous avons extrait un certain nombre de pistes à explorer. Nous avons souhaité privilégier l’aspect intégration visuelle de données géographiques hétérogènes, sur un même espace géographique, où non seulement les phénomènes géographiques à représenter sont complexes dans leur modélisation et dans leur compréhension par le grand public, mais aussi où les représentations (carto)graphiques existantes sont particulièrement hétérogènes (en données représentées, en échelle, en complexité visuelle, en légende, etc.) de part et d’autre du trait de côte. Le dernier aspect étant que le trait de côte est un objet particulièrement imprécis. Ce travail a également donné lieu à une communication au Séminaire Litto3D organisé à Brest, en Octobre 2016.

Problématique La région littorale est une zone à enjeux multiples, son observation fournit de nombreux jeux de données géographiques. Les verrous actuels se situent sur l’intégration et le rendu visuels de ces données : (1) les données géographiques permettant de caractériser la mer doivent être intégrées et combinées afin d’obtenir la profondeur d’eau et l’interface terre/mer (problème d’hétérogénéité des données géographiques et thématiques), (2) les systèmes existants ne permettent pas d’obtenir un rendu visuel continu terre/mer, et cohérent avec les styles des rendus usuels (problème d’hétérogénéité des représentations graphiques). La représentation des dynamiques spatio-temporelles autour de cette interface, en particulier des marées, ajoute une difficulté supplémentaire à la conception de géo-visualisations compréhensibles et utilisables par le grand public.

Méthodologie Deux types de verrous ont été distingués. Premièrement, la représentation simultanée de la mer et de la terre nécessite des données précises (*précision d’observation*) et continues terre/mer afin de fournir une représentation visuelle continue de part et d’autre de l’interface terre/mer (*continuité d’observation*). Un deuxième verrou concerne le style à appliquer aux données afin d’augmenter le réalisme perçu par l’utilisateur (*précision de la perception du réalisme*). Nous proposons d’améliorer la géo-visualisation du littoral afin de représenter de façon plus réaliste les dynamiques de la profondeur d’eau : (1) par l’utilisation de données plus fidèles à la réalité comme le LiDAR, qui permettent de représenter précisément et de manière continue les objets géographiques du littoral, sur terre et en mer et ainsi d’accentuer le réalisme perçu et (2) par la manipulation du rendu de la profondeur d’eau selon des styles usuels correspondants au niveau d’abstraction (via la carte) ou de photo-réalisme (via les ortho-images) de la représentation côté terre.

Mise en œuvre La Figure 3.28 présente les trois étapes de la méthodologie empruntée pour proposer des géo-visualisations du littoral :

1. **Sélection de données pertinentes pour la visualisation.** Côté terre, nous disposons d’informations variées et hétérogènes : base de données vecteur, cartes topographiques et ortho-images. Côté mer, pour estimer et représenter dynamiquement la profondeur de l’eau, nous avons besoin de deux informations principales : un modèle numérique de terrain (MNT) pour l’information d’élévation du terrain (sous-marin ou non) et l’information de hauteur d’eau fournie par l’observation des marées. Par ailleurs, ces données vont également nous servir à l’étape suivante pour séparer la terre et la mer de manière dynamique.

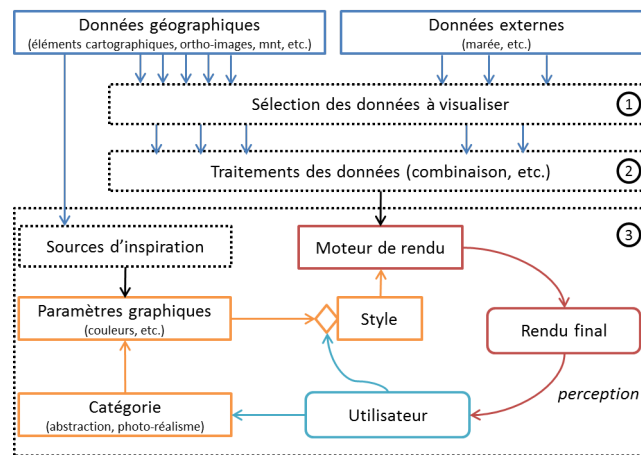


FIGURE 3.28 – Méthodologie proposée pour la géo-visualisation du littoral (Masse and Christophe, 2016a).

Données utilisées : un MNT issu de données LiDAR bathymétrique et aéroporté (Litto3D4®) ; de données de marée (Refmar5®) ; de données topographiques : occupation du sol, zones urbaines, hydrographie, réseaux routiers, informations touristiques, etc. ; des légendes pour la cartographie (IGN et SHOM) et des ortho images 50cm (BD ORTHO®).

2. **Pré-traitements spécifiques des données pour la visualisation du littoral.** Le but de cette étape est de traiter les données existantes pour représenter la profondeur d'eau et l'interface terre/mer de manière dynamique en fonction des informations de marée. La profondeur d'eau s'obtient par différence entre l'élévation de l'eau (marée) et l'élévation du terrain. Le calcul de l'interface terre/mer s'obtient en effectuant l'intersection de la surface du terrain et de la surface d'eau (marée). La précision de ces deux informations dépend donc à la fois de la précision de l'élévation du terrain et de l'estimation de la hauteur d'eau.
3. **Processus de rendu cartographique.** Le rendu final est une séquence temporelle continue des éléments à visualiser. Les données côté terre sont immédiatement visualisables dans un moteur de rendu type SIG. Les données traitées à l'étape précédente nécessitent d'être rendues dynamiquement (choix du pas de temps) pour créer une animation finale permettant de visualiser dynamiquement les variations de profondeur d'eau et d'évolution de l'interface terre/mer. Pour faire cela, nous utilisons les capacités de description du style des normes OGC, SLD et SE (Cf. 3.2.2). Ces paramétrisations peuvent être guidées par des sources d'inspiration (légendes existantes, etc.) qui aident à la définition de paramètres graphiques.

Infrastructure utilisée : plateforme SIG OpenSource GeOxygene, et son moteur de rendu OpenGL développé dans le cadre du projet ANR Mapstyle, implémentation du paramètre *ColorMap* du *RasterSymbolizer* de la norme SE et des *Shaders* associés pour gérer la stylisation des données, et en particulier calculer les différentes colormaps à partir de l'ortho-image en entrée : affectation des couleurs, palettes de couleurs ou gradients de couleurs à des valeurs ou intervalles de valeurs choisis, qui dans notre cas, correspondent aux profondeurs d'eau. L'option interpolation de couleurs du paramètre *ColorMap* a également été développée et permet d'obtenir un rendu continu entre plusieurs valeurs de profondeur, contrairement à l'utilisation de teintes hypsométriques comme cela est généralement le cas dans les visualisations existantes. Deux palettes de couleurs sont utilisées : une palette de couleurs dites conventionnelles basée sur les standards cartographiques de l'Organisation Hydrographique Internationale (OHI¹²), et une palette de couleurs naturelles extraites de la partie maritime de l'ortho-image par la méthode décrite dans (Hoarau and Christophe, 2015).

Résultats L'approche résumée est représentée figure 3.29 : une palette de couleurs est extraite à partir d'une source d'inspiration ; cette palette est appliquée pour styliser le MNT selon la valeur de la profondeur d'eau et de l'information de marée, afin de fournir une animation dynamique de profondeur d'eau.

12. <https://www.iho.int/srv1/index.php?lang=fr>

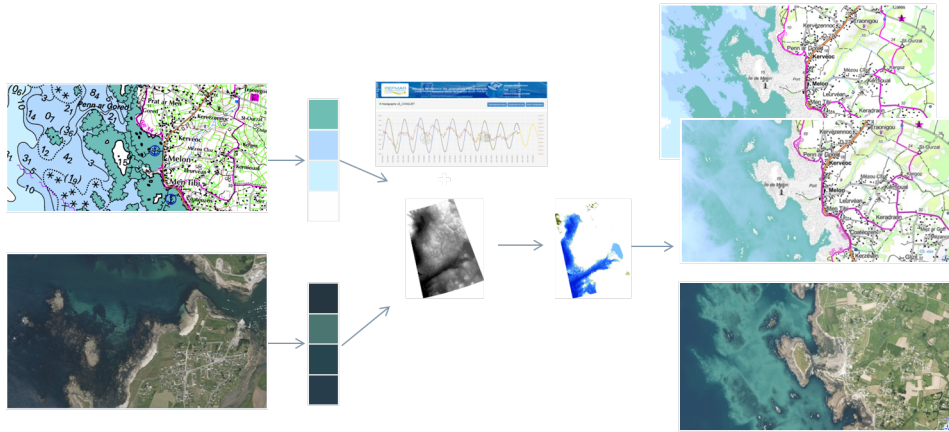


FIGURE 3.29 – Stylisation du MNT en fonction de différentes sources d’inspiration (Masse and Christophe, 2016b).

Abstraction cartographique Nous avons conservé la stylisation de la partie terrestre et nous nous sommes inspirés des couleurs conventionnelles (légende officielle définie par l’OHI) pour styliser l’information de profondeur d’eau. L’information de hauteur d’eau obtenue à partir des données de marée est utilisée par le système de visualisation pour donner du dynamisme à l’information de profondeur d’eau. La Figure 3.30 présente des extraits du rendu final en mode abstraction, montrant, la cohérence visuelle entre terre et mer, et la séquence temporelle permettant de visualiser le "détachement" d’une île à marée haute. L’interpolation de couleurs donne une vision artificielle de la topographie sous-marine en faisant apparaître dynamiquement les dangers tels que les rochers immergés/émergés (visibilité de l’empreinte des rochers immergés).

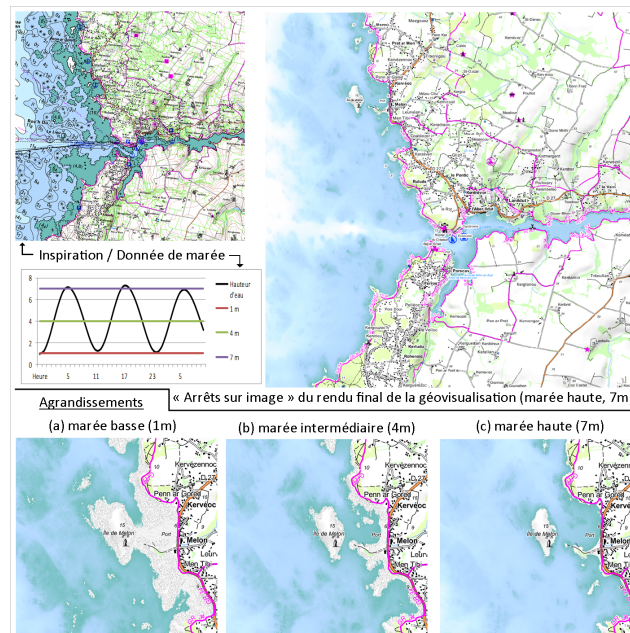


FIGURE 3.30 – Extraits du rendu final animé de la géovisualisation du littoral à plusieurs états de marée dans l’estuaire de Lanildut : représentation abstraite continue par couleurs conventionnelles de la profondeur d’eau. (Masse and Christophe, 2016a).

(Ortho)Photo-réalisme Les ortho-images de la mer posent plusieurs problèmes de discontinuités de rendu, dues par exemple aux discontinuités d’observation (marées différentes), ou encore aux problèmes de saturation de luminosité (vagues, cf. inspiration figure 3.31). Les ortho-images ne fournissent qu’une vue statique de la mer, représentative de l’état de la zone lors de l’observation et sans perception directe des dynamiques de celle-ci. Afin de corriger ces problèmes de visualisation de la mer (irrégularités,

représentation statique), nous proposons de remplacer la partie maritime d'une ortho-image par l'information de profondeur d'eau stylisée par notre système. Comme pour l'exemple précédent, nous utilisons les mêmes données pour représenter la partie maritime (profondeur d'eau), mais nous nous inspirons des couleurs naturelles de la partie maritime de l'ortho-image pour styliser la profondeur de l'eau. La figure 3.31 présente des extraits du rendu final en mode photo-réalisme, montrant la cohérence visuelle entre terre et mer ; la perception du fond marin, même s'il n'est pas suffisamment descriptif (sable ou rocher), ajoute de l'information dynamique et du sens à l'ortho-image et permet donc une meilleure transmission de l'information côté mer avec, comme pour l'exemple précédent, une meilleure perception des zones immergées/émergées et une utilisation possible pour l'accessibilité des îles (exemple ici de l'île de Melon). Sur le même principe, il est possible de représenter une infiltration d'eau en 2D¹³.

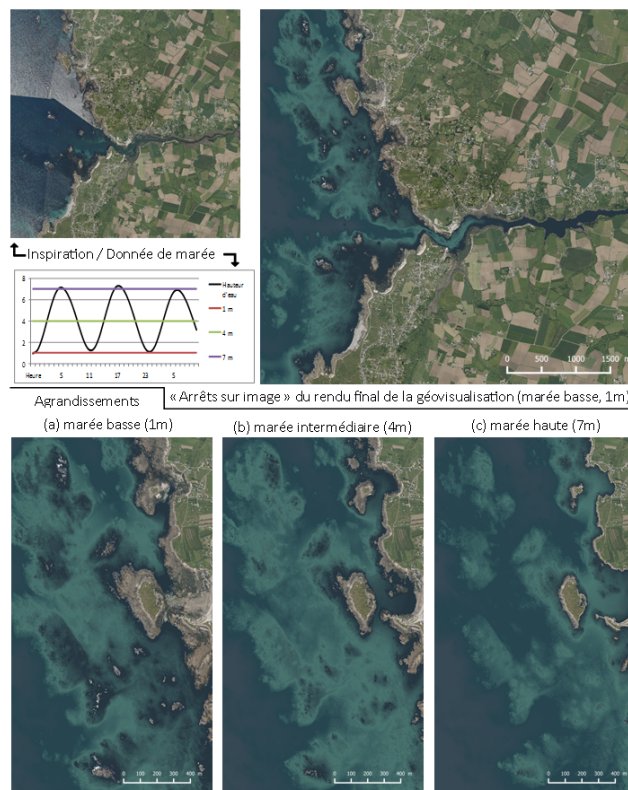


FIGURE 3.31 – Extraits du rendu final animé de la géovisualisation du littoral à plusieurs états de marée dans l'estuaire de Lanildut : représentation ortho-photo-réaliste continue par couleurs naturelles de la profondeur d'eau. (Masse and Christophe, 2016a).

L'ensemble des animations est visible sur ce lien : <https://youtu.be/TIm1kLAYGxg>.

Réalisme 3D En utilisant les mêmes services d'accès aux données géographiques (WMS, WMTS) et thématiques sur la marée (http), ainsi que les mêmes *Shaders*, une application de géovisualisation 3D a été développée sur la plateforme iTowns¹⁴, en Web-GL, basée sur three.js. La 3è dimension apporte ici plus d'interaction possible avec la visualisation (déplacements) et permet d'augmenter la perception et la compréhension du phénomène de marée. Des vidéos de la représentation de l'infiltration d'eau en 3D, ainsi que la représentation de la marée sur une plage en 3D sont disponibles en ligne¹⁵.

Conclusion L'utilisation de données plus précises influe positivement sur la perception du réalisme, avec une perception des fonds marins et des zones immergées/émergées, ce qui améliore l'expérience de l'utilisateur ; (2) A partir d'une même donnée (la profondeur d'eau), et d'une stylisation différente, nous

13. <https://youtu.be/1UZ5V9nqvVE>

14. <http://www.itowns-project.org/>

15. <https://youtu.be/X4EzCt561gk>

avons montré qu'il était possible d'adapter le rendu à des usages potentiels de l'utilisateur : abstractions cartographiques et photo-réalisme. La méthode est générique et indépendante des bases de données utilisées (ortho-image ou vecteur) ; (3) Le système de rendu permet également un rendu animé ou statique (type arrêt sur image), ce qui fournit à l'utilisateur des informations supplémentaires sur le dynamisme des éléments du littoral en fonction des marées, et notamment ici de l'interface terre/mer et de la profondeur de l'eau ; (4) Les applications présentées ouvrent également la voie à de nouveaux cas d'usages des géovisualisations en zone littorale avec des itinéraires de randonnées pouvant désormais prendre en compte les dynamiques de l'interface terre/mer mais également d'autres utilisations comme la pêche à pied, la baignade, etc.

3.3.2 Continuum de représentations cartographiques : injecter du photo-réalisme dans l'abstraction cartographique

Cette sous-section présente la thèse de Charlotte Hoarau que j'ai encadrée, dirigée par Sébastien Mustière (Hoarau, 2015) sur la proposition d'une méthode d'interpolation des couleurs et des textures abstraites et naturelles, pour concevoir des visualisations hybrides entre données vecteur symbolisées et ortho-images, afin de contrôler le niveau de photo-réalisme dans la carte (Hoarau et al., 2013b,a, 2015; Hoarau and Christophe, 2015, 2016). Il s'agit ici d'un résumé du papier (Hoarau and Christophe, 2016).

Problématique Au démarrage de sa thèse de doctorat, Charlotte Hoarau a commencé par réaliser une étude auprès des sites web développés à partir de l'API du géoportail, pour en analyser les choix de design et les usages, dans l'objectif d'analyser les grandes tendances de visualisation et/ou de co-visualisation sur un géoportail : données affichées par défaut (carte ou ortho-image), échelles de visualisation, niveaux de transparence possibles dans le cas de co-visualisation proposées, usages visés pour les utilisateurs du site (Hoarau, 2012). Un des résultats de ce travail est que carte et ortho-image sont très utilisées dans les visualisations par défaut et très utilisées ensemble : des fonctionnalités d'interface permettent effectivement de manipuler ensemble ces représentations, en particulier par la gestion de la transparence. Par contre, l'analyse de la qualité de cette transparence montre, qu'excepté aux extrémités de l'axe de la transparence entre carte et ortho-image, il y a toute une zone où la transparence entre les deux types de données génère une visualisation assez illisible, sur laquelle on ne peut effectuer aucune tâche de cartographie.

La co-visualisation de données géographiques hétérogènes pose des questions intéressantes en termes de conception et d'usage. Envisager des moyens de mieux co-visualiser carte et ortho-image, permettrait d'une part de bénéficier des qualités des deux types de représentation, même si elles peuvent paraître a priori incompatibles, d'autre part d'introduire du photo-réalisme dans l'abstraction de la carte. En termes d'usage, cela permettrait aux utilisateurs, de se repérer plus facilement ou de mieux comprendre et reconnaître le territoire représenté.

De nouveaux types de cartes topographiques peuvent être envisagés si l'on considère qu'il serait pertinent de mixer des propriétés visuelles provenant de données vecteur symbolisées (contenu des légendes et styles) et de l'ortho-image correspondante. Être capable de paramétrer le mélange de ces propriétés visuelles, permettrait de contrôler le niveau de photo-réalisme dans la visualisation hybride finale. Le mélange raster-vecteur se fait depuis longtemps, pour co-visualiser des données vecteur sur un fond raster ("spatio-cartes"), et de plus en plus de fonds mixés apparaissent sur les géoportails. La recherche s'intéresse en particulier à la résolution de problèmes de lisibilité par la gestion des contrastes de couleurs (Raposo and Brewer, 2011; Hoarau et al., 2013b; Murphy, 2015). Des états de l'art sur le contrôle de l'abstraction et du photo-réalisme dans la conception cartographique comme en visualisation 3D, ainsi que sur les méthodes de rendu et leur paramétrage pour contrôler différents styles de rendu sont disponibles dans (Hoarau and Christophe, 2016; Brasebin et al., 2016a).

Il serait surtout intéressant de pouvoir naviguer dans l'espace des possibles cartographiques, délimité par les données à hybrider, piloté par le niveau de photo-réalisme, c'est-à-dire *concevoir des continuums de représentations topographiques*.

Méthodologie Un continuum de représentations topographiques utilise des transitions continues basées sur des interpolations de variables visuelles (couleurs, textures), provenant des deux types de données à hybrider, guidées par des points de contrôle spécifiques, e.g. des représentations intermédiaires, sélectionnés par l'utilisateur. Le niveau de photo-réalisme a été considéré comme la propriété visuelle et perceptuelle à contrôler lors de ces transitions continues. Il faut noter que la lisibilité reste la contrainte

majeure tout au long des transitions. La proposition de Charlotte Hoarau se base sur le processus suivant représenté par la figure 3.32 :

1. Extraction des couleurs et manipulation des effets de textures provenant de l'ortho-image, à confronter aux couleurs des données vecteur symbolisées, comme propriétés visuelles pertinentes pour contrôler le niveau de photo-réalisme perçu (*Natural appearance extraction*).
2. Interpolation des couleurs et des textures à l'aide de blocs élémentaires, afin de naviguer régulièrement entre les propriétés visuelles des deux données extrêmes à interpoler (*Color and texture interpolation blocks*).
3. Conception globale pour piloter différemment le comportement de ces différents blocs d'interpolation, pour chacune des couches géographiques à considérer, et ainsi construire différents continua possibles entre les deux types de données géographiques (*Global design method*) : sélection des blocs d'interpolation (1), sélection des points de contrôle (2), spécification du comportement de ces blocs (3).

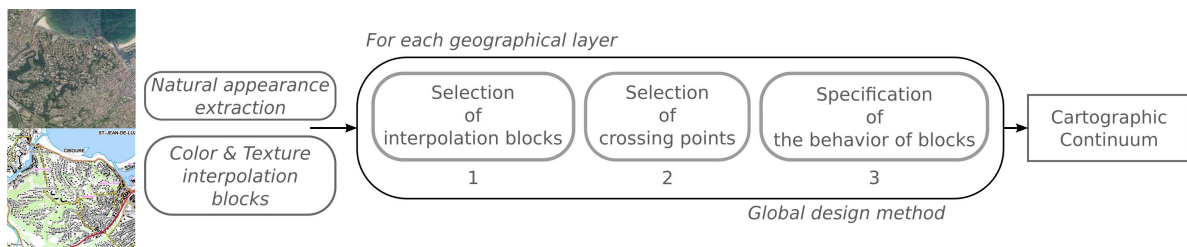


FIGURE 3.32 – Processus global de conception d'un continuum de représentations topographiques (Hoarau and Christophe, 2016)

1- Extraction de couleurs naturelles et effets de textures Charlotte Hoarau a proposé une méthode d'extraction des couleurs naturelles de l'ortho-image, à partir de la couche vecteur et du masque binaire correspondants. L'ortho-image est ainsi découpée par le masque, pour en extraire un patch. La couleur naturelle du patch est calculée à l'aide de la méthode de classification des couleurs décrite dans (Christophe et al., 2013) et dans la section 2.2 de ce mémoire¹⁶ : il s'agit de la couleur moyenne du principal cluster. Ce calcul a été réalisé pour chaque type d'objets géographiques de la zone concernée, en ne considérant qu'une seule couleur par thème géographique.

À partir d'un mélange des variables visuelles, couleur, texture initiale et transparence, des effets de texture vont pouvoir être générés, pour véhiculer l'effet de photo-réalisme. Les données vecteur sont symbolisées avec des aplats de couleurs, dit effet de texture *neutre* ; les ortho-images donnent des textures correspondant aux éléments du territoire représentés, dit effet de texture *naturel*. Des textures *procédurales* vont être aussi utilisées pour générer des effets réalistes, à partir de l'aléatoire des fonctions de bruit : Charlotte Hoarau a proposé de travailler à partir de textures de bruit de Perlin (Perlin, 1985) qui peuvent être paramétrées (couleurs, échelle, quantité, étirement et angle d'orientation). La figure 3.33 présente les différents types d'effets de texture qui peuvent être manipulés en fonction d'une texture initiale, d'une couleur associée et d'un niveau de transparence : cette figure permet de visualiser la grande diversité de variations sur les couleurs et les textures que l'on peut obtenir (neutre, naturelle, procédurale and mixte). Des modes de mélange différents peuvent également être utilisés afin de mélanger les couleurs des couches superposées (*Overlay mode* par exemple).

2- Interpolation de couleurs et de textures La difficulté d'interpoler couleurs et textures est de prendre en compte les spécificités de chacun dans les transitions continues : cela implique de fournir un ensemble de blocs d'interpolation, chacun étant adapté à un paramètre visuel. Pour tous les blocs d'interpolation possibles, Charlotte Hoarau a visé à créer un chemin graphique régulier évoluant tout au long du continuum. Les blocs d'interpolation utilisent tous une méthode linéaire d'interpolation.

Bloc d'interpolation de couleurs : l'objectif est, non pas de différencier des sauts entre les couleurs (comme on le ferait pour un dégradé), mais bien de concevoir une transition continue entre des couleurs : cette régularité perceptuelle attendue implique de manipuler l'espace de couleurs uniforme CIE Lab. Par

16. Méthode des K-means dans l'espace des couleurs CieLAB.

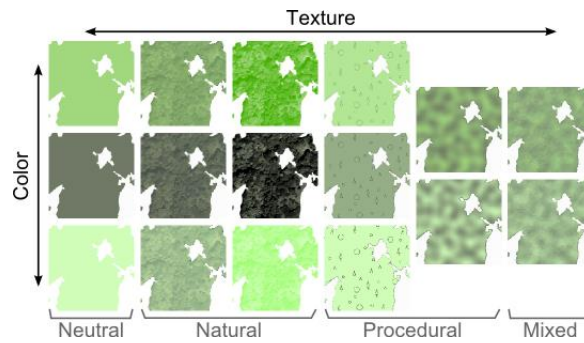


FIGURE 3.33 – Effets de texture, couleurs et transparence pour une symbolisation de la végétation (Hoarau, 2015; Hoarau and Christophe, 2016).

exemple, le bloc d'interpolation peut être utilisé pour interpoler des couleurs entre deux cartes ayant la même légende mais avec des couleurs différentes : les couleurs d'un thème géographique sont interpolées indépendamment des autres, thème à thème. La figure 3.34 donne un exemple de continuum entre une carte topographique classique IGN et son équivalent en couleurs naturelles : ce continuum montre le potentiel de la transition continue entre des couleurs conventionnelles et des couleurs naturelles dans une carte.



FIGURE 3.34 – Interpolation de couleurs entre une carte topographique classique et une carte topographique en couleurs naturelles (Hoarau and Christophe, 2016).

De la même façon, un bloc d'interpolation de couleur peut être utilisé entre deux rasters, à partir du moment où les deux rasters transmettent le même type d'information, i.e. deux ortho-images de la même scène par exemple. L'intérêt de ce bloc pour les ortho-images est de pouvoir par exemple interpoler entre l'image et son équivalent en niveaux de gris, et mettre en évidence la texture naturelle (Cf. figure 3.35).

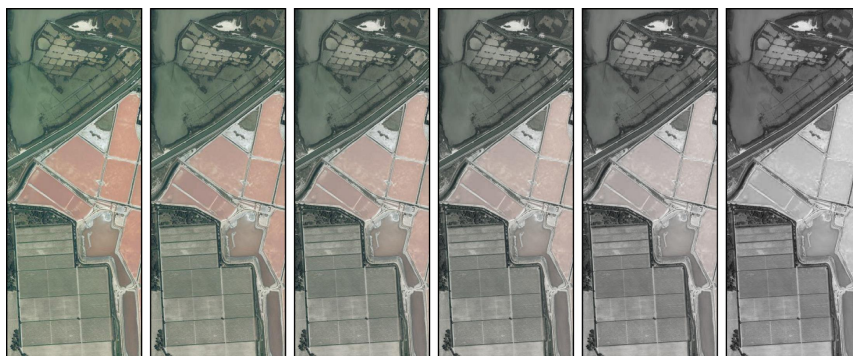


FIGURE 3.35 – Interpolation de couleurs entre une ortho-image et sa version en niveaux de gris (Hoarau, 2015; Hoarau and Christophe, 2016).

Bloc d'interpolation de textures : différents blocs d'interpolation de textures ont été proposés, adaptés à chaque paramètre possible de la texture (opacité, quantité, par exemple). Interpoler l'opacité des données vecteur sur un fond ortho-image permet de contrôler la texture naturelle provenant de l'image

(Cf. Figure 3.36). Interpoler la quantité de texture permet de contrôler la visibilité de cette texture, par exemple (Cf. Figure 3.37). Mixer ces deux types d'interpolation permet différents niveaux de contrôle du niveau de photo-réalisme.

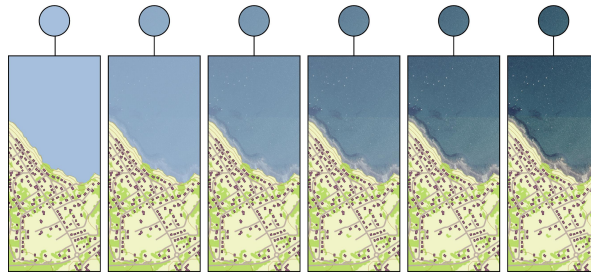


FIGURE 3.36 – Interpolation de texture *naturelle* sur le thème mer, par alpha blending sur l'ortho-image (Hoarau, 2015; Hoarau and Christophe, 2016).

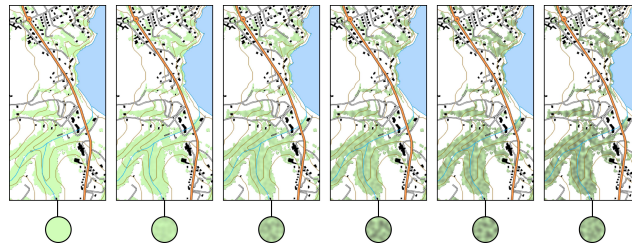


FIGURE 3.37 – Interpolation de texture *procédurale* sur le thème végétation, par augmentation de la quantité de texture (Hoarau, 2015; Hoarau and Christophe, 2016).

3- Méthode de conception globale Nous décrivons ici brièvement les trois étapes de la méthode de conception globale (*Global design method*), représentées dans la figure 3.32, permettant de construire un ou plusieurs continua cartographiques entre des données vecteur symbolisées et l'ortho-image correspondante.

1- Sélection des types d'interpolation : cette étape consiste à sélectionner le(s) type(s) d'interpolation à réaliser (couleur et/ou texture) pour chaque thème géographique de la légende considérée. Les interpolations se font thème à thème, elles sont indépendantes entre thèmes¹⁷.

2- Sélection des points de contrôle : cette étape consiste à sélectionner des points de contrôle spécifiques entre les deux extrémités du continuum, qui vont permettre ensuite de spécifier le comportement exact du ou des bloc(s) dans l'étape 3. Il s'agit donc de définir comment on souhaite naviguer dans l'espace cartographique en définissant une sorte de point d'inflexion dans le continuum, et donc contrôler le type de transition continue souhaitée. Par exemple, la figure 3.38 montre un point de contrôle, qui est une représentation intermédiaire élémentaire, de la mer, entre sa représentation dans l'ortho-image (à gauche, représentée par le patch image de la mer, et deux carrés représentant respectivement, la présence et la couleur de la texture) et sa représentation dans la carte (à droite, représenté par l'extraction de l'objet dans la couche vecteur, et deux carrés représentant respectivement l'absence de texture et la couleur abstraite de la donnée symbolisée). Le point de contrôle est donc une représentation intermédiaire combinant des propriétés visuelles des deux extrémités, la couleur naturelle de l'ortho-image (représentée par le carré de couleur correspondant) et l'absence de texture venant de la carte (représentée par le carré de texture barré).

3- Spécification des comportements des blocs d'interpolation : cette étape consiste en la spécification du comportement des blocs d'interpolation (apparition, ordre) : ils peuvent en effet fonctionner en parallèle tout au long du continuum (couleur et texture sont interpolées tout au long du continuum), évoluer successivement et dans un ordre à établir (d'abord une interpolation de couleur suivie d'une interpolation de texture, par exemple), ou finalement fonctionner seulement sur une partie du continuum, d'une extrémité à un point de contrôle.

17. il est important de différencier cette étape des autres, même si à ce stade cela reste un peu artificiel, parce que cette étape pourrait être le point d'entrée pour l'utilisateur qui pourrait exprimer vouloir travailler sur la couleur ou sur la

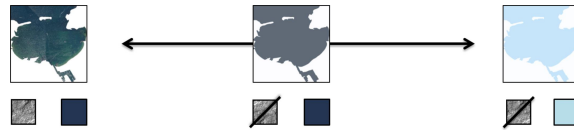


FIGURE 3.38 – Point de contrôle possible pour la représentation de la mer entre sa représentation dans une ortho-image et dans une carte. Les petits carrés donnent pour chaque représentation la présence/absence d'une texture et sa couleur (Hoarau and Christophe, 2016).

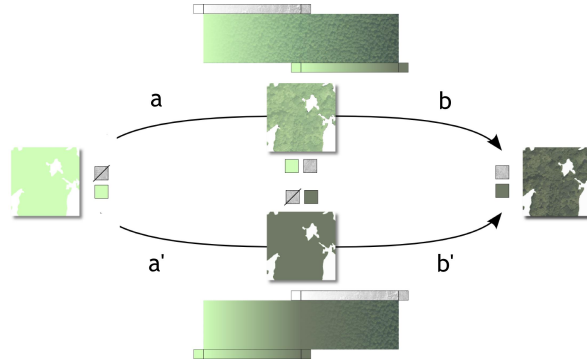


FIGURE 3.39 – 2 chemins graphiques possibles à l'aide de blocs d'interpolation de couleurs et textures, pour la représentation de la végétation (Hoarau, 2015; Hoarau and Christophe, 2016).

Par exemple, la Figure 3.39 montre deux chemins graphiques possibles entre deux représentations de la végétation, de la carte (à gauche) à l'ortho-image (à droite)¹⁸. Pour chaque chemin graphique, deux blocs d'interpolation sont successivement utilisés, mais dans un ordre différent entre le chemin du haut et celui du bas, en fonction de deux points de contrôle différents :

- chemin graphique haut : étape *a* : même couleur que la carte et interpolation de texture ; étape *b* : même texture et interpolation de couleur.
- chemin graphique bas : étape *a'* : pas de texture comme dans la carte et interpolation de couleur ; étape *b'* : même couleur et interpolation de texture.

Ainsi différentes stratégies peuvent être spécifiées par les utilisateurs afin de concevoir des continua cartographiques : certains pourraient vouloir se concentrer sur la sélection de points de contrôle et sur le contrôle du comportement des blocs, pour tester plusieurs chemins graphiques, pour chaque couche du jeu de données géographiques considéré. Cette méthode globale de conception peut être utilisée entre des données vecteur et une ortho-image, comme entre deux cartes. Le seul pré-requis pour l'instant est que les structures des données représentées puissent être alignées entre elles : en effet, il faut pouvoir aligner les thèmes des légendes, entre deux cartes, ou les thèmes de la légende avec des objets de l'image, entre une carte et une ortho-image.

Résultats : architecture pour la conception de continuum cartographique

Architecture L'architecture proposée se base sur le modèle de style au formalisme SLD/SE étendu (Cf. section 3.2). Chaque représentation est décrite dans un fichier SLD et il existe un fichier SLD pivot permettant de combiner les paramètres graphiques des représentations à hybrider.

Cas d'étude et données géographiques utilisées Le cas d'étude utilise des données géographiques IGN : une carte topographique utilisant la base de données vecteur ©IGN SCAN Express map, et son ortho-image associée ©IGN BD ORTHO, sur le territoire de la commune de Saint Jean de Luz, France. L'objectif est de concevoir un continuum cartographique entre la carte topographique et l'ortho-image, en s'appuyant sur les données vecteur symbolisées, pour manipuler les thèmes géographiques indépendamment les uns des autres. Le jeu de données est composé des routes, des bâtiments, de l'hydrographie, de la végétation et du fond cartographique.

texture pour chaque thème, sans avoir à définir quoi que ce soit d'autre.

18. Il est également possible de naviguer de droite à gauche.

Résultats Chaque thème géographique a été traité différemment en fonction du type d'objets représentés (distribution et structure spatiales) et des contraintes cartographiques sur la lisibilité (par exemple, les routes doivent toujours être visibles quelle que soit la couleur du fond cartographique, ou, les contrastes de couleurs doivent être préservés) et sur les usages conventionnels de la couleur (par exemple, l'hydrographie doit rester bleue). La figure 3.40 représente les différents blocs d'interpolation et les différents points de contrôle sélectionnés, pour créer le continuum cartographique de la figure 3.41.

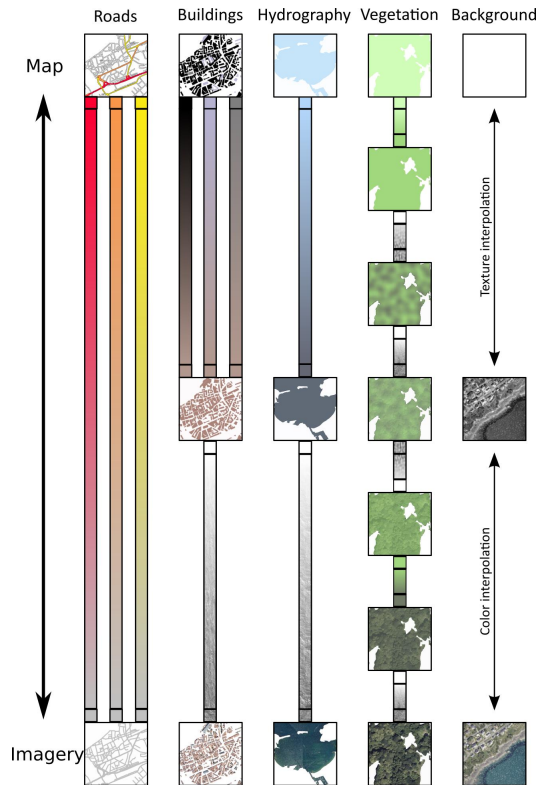


FIGURE 3.40 – Paramétrisation du continuum cartographique de la figure 3.41 entre une carte topographique et une ortho-image (Hoarau, 2015; Hoarau and Christophe, 2016).

La règle pour les **routes** est de préserver la catégorisation administrative et donc la relation sémantique d'ordre provenant de la carte : les 3 différentes catégories de routes, ordonnées par leurs couleurs, doivent rester visibles et être contrastées avec le reste des données au maximum. 3 blocs d'interpolation pour les routes sont utilisés, tout au long du continuum, pour interpoler de la couleur abstraite dans la carte au gris naturel de l'ortho-image. La proposition pour les **bâtiments** est de réaliser une transition continue entre les 3 catégories de bâtiments de la carte, i.e. en relation d'association, et la couleur et la texture naturelles de l'ortho-image, i.e. couleur et texture des toits des bâtiments : cela implique de définir un point de contrôle et deux étapes de part et d'autre. La première étape consiste à interpoler les 3 couleurs de bâtiments de la carte jusqu'à la couleur du point de contrôle, i.e. la couleur naturelle des toits dans l'ortho-image. La deuxième étape consiste à interpoler la texture depuis le point de contrôle (absence) jusqu'à l'ortho-image (présence d'une texture naturelle). La proposition pour l'**hydrographie** est de faire une transition continue avec le point de contrôle présenté dans la figure 3.38 : d'abord une interpolation de couleurs jusqu'au point de contrôle (couleur naturelle) puis une interpolation de texture par opacité. Pour la **végétation**, plusieurs points de contrôle ont été spécifiés, afin de contrôler plus finement la transition continue de sa représentation. Plusieurs combinaisons de textures procédurales et naturelles, couleurs et alpha blending ont été utilisés. Charlotte Hoarau a mené une étude auprès d'utilisateurs afin de valider le type de textures à utiliser et l'ordre des textures à proposer, afin de contrôler la continuité des transitions et le niveau de photo-réalisme dans les visualisations hybrides (Cf. mémoire de thèse (Hoarau, 2015)) : plusieurs séries de blocs d'interpolation de couleurs et de textures ont été utilisées. Le **fond cartographique** est très clair dans la carte alors qu'il est plutôt sombre dans l'ortho-image : la proposition a été de manipuler 2 blocs d'interpolation successifs : le premier interpole le blanc du fond vers l'image en niveaux de gris, le deuxième interpole de l'image en niveaux de gris à l'image initiale. Le point de contrôle est donc l'ortho-image en niveaux de gris présentée précédemment.

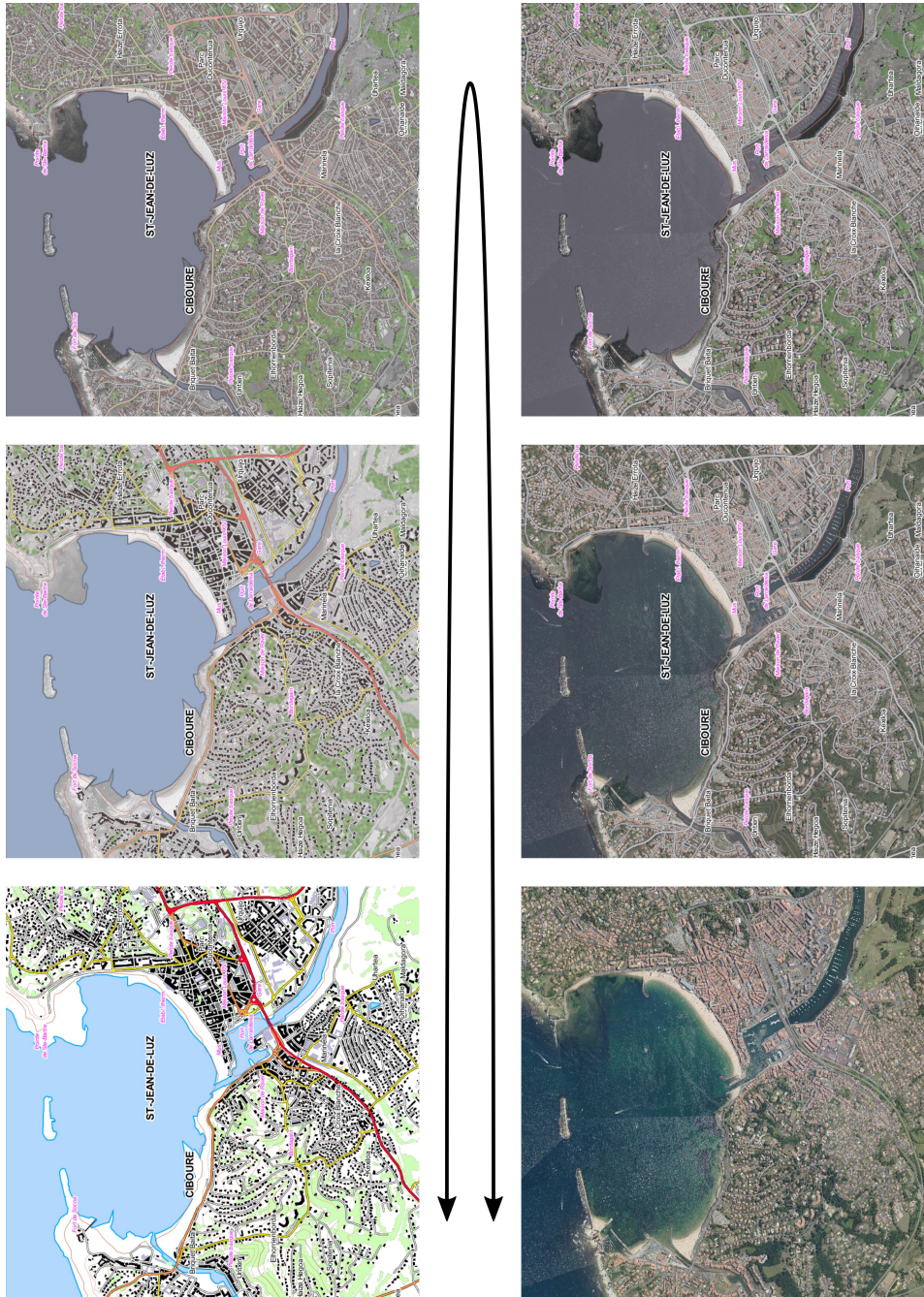


FIGURE 3.41 – Continuum cartographique avec les paramètres présentés ci-dessus (Hoarau, 2015; Hoarau and Christophe, 2016).

3.3.3 Géovisualisation et stylisation 3D : mixer expressivité et photo-réalisme

Cette section présente la problématique et les résultats du projet PEPS Plu++, coordonné par Mickaël Brasebin (IGN/COGIT) pour la partie Simulation 3D, en partenariat avec Florence Jacquinod (EIVP) pour la partie Usages 3D, et moi-même pour la partie Stylisation 3D. Nous collaborons tous les trois, en apportant chacun notre expertise, avec l'aide également de deux stagiaires, Hortense Mahon à l'EIVP encadrée par Florence et Anouk Vinessé à l'IGN encadrée par Mickaël et moi (avril-sept 2016). Notre positionnement avait été décrit en amont de ce projet dans (Brasebin et al., 2015a,b) suite au stage de Florian Pelloie, encadré par Mickaël Brasebin, Elodie Buard et moi-même en 2014. Je résume ici le papier présenté à 3DGeoInfo'2016 (Brasebin et al., 2016a), suite aux résultats du stage d'Anouk Vinessé, ainsi qu'en poster à SAGEO2016 (Brasebin et al., 2016b), en particulier les aspects liés à la stylisation 3D.

Problématique Les géo-visualisations 3D sont de plus en plus utilisées et appréciées dans le contexte de la concertation publique généralement pour présenter des projets en cours d'élaboration. La concertation citoyenne autour de l'élaboration des documents d'urbanisme pourrait également bénéficier de ces géo-visualisations 3D. Nous avons pour objectif de concevoir un système de géo-visualisation 3D facilitant la participation autour de l'élaboration des Plans Locaux d'Urbanisme (PLU). A travers une approche pluridisciplinaire, nous cherchons à couvrir différents aspects du problème : 1)- la simulation de formes à bâtir pour représenter la réglementation (Simulation 3D), 2)- une représentation graphique efficace de ces formes que les citoyens puissent comprendre l'impact de la réglementation (Stylisation 3D), 3)- la connaissance des usages de la 3D par les utilisateurs (élus, médiateurs, citoyens) dans le cadre de la concertation citoyenne (Usages 3D). Notre système a pour but de s'adapter à la concertation et à la dynamique de la participation. Il devra fournir des possibilités de modification des résultats de simulation et des styles de rendu pour supporter efficacement la concertation. Les styles de rendu proposés seront utilisés dans un ensemble d'expérimentations afin de tester et valider nos hypothèses, issues de nos travaux de recherche antérieurs et de l'état de l'art, sur la simulation 3D, la sémiologie 3D, et nos connaissances sur les usages de la 3D.

Question Comment la stylisation 3D peut apporter de l'aide à une meilleure compréhension de la réglementation urbaine, dans le cadre de la concertation 3D? Comment représenter des formes à bâtir (simulées) pour faire comprendre le scénario dont elles sont issues, et comment vont-elles s'intégrer dans un environnement, en particulier comment bien faire comprendre si un bâtiment est réel et existant et si il est simulé, et de quelle(s) règle(s) il est issu?

Approche Un état de l'art est fourni dans (Brasebin et al., 2016a) sur les usages et les limites de la 3D dans le cadre de la concertation citoyenne en général, sur la simulation d'information sur la constructibilité et sur le rendu 3D, en termes de stylisation et d'interaction. Dans ce papier, nous dessinons les grandes lignes du fonctionnement d'un système de concertation publique à partir d'un système de géo-visualisation 3D. Notre approche consiste à proposer des géo-visualisations 3D de résultats de simulation de formes à bâtir, pour faciliter la concertation. Notre système se décompose en trois sous-systèmes et leurs interactions, représentés par la figure 3.42 :

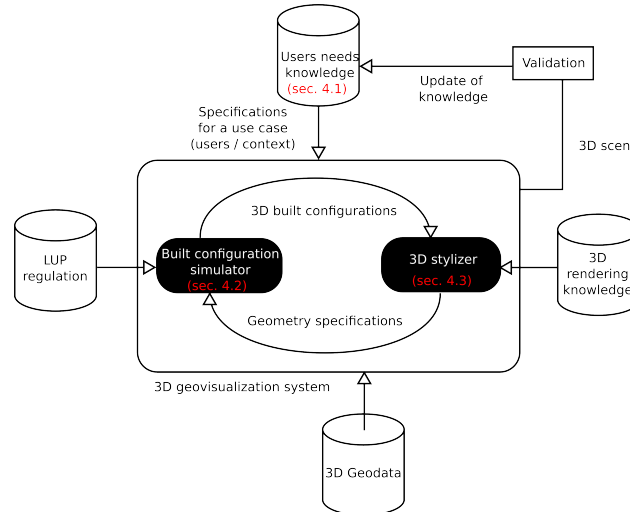


FIGURE 3.42 – Pipeline global de notre approche (Brasebin et al., 2016a).

1. **l'outil de simulation des formes à bâtir** (*Build configuration simulator*) : un moteur de simulation existant produit des formes à bâtir en fonction des paramètres fixés par la réglementation urbaine (Brasebin et al., 2011, 2015c, 2016c) : ces géométries doivent être adaptées au scénario prévu et au type de style de rendu à appliquer ensuite ;
2. **l'outil de stylisation 3D** (*3D stylizer*) : une contribution de ce projet consiste à formaliser et à implémenter un processus de rendu 3D générique, utilisant des styles de rendu 3D, préalablement explicités : ce sous-système est basé sur les connaissances préalables en rendu et représentation 3D partagées par les partenaires du projet. Cet outil doit également fournir des spécifications sur les géométries en entrée de la stylisation, et donc à fournir dans l'étape précédente.

3. **l'acquisition de connaissances sur les besoins et usages des utilisateurs** (*Users needs knowledge*) : ces connaissances proviennent à la fois de travaux de recherche en amont, et d'expérimentations utilisateur à venir : ce sous-système fournit des spécifications sur les utilisateurs et le contexte d'utilisation des géovisualisations 3D, en général et pour des cas d'usages particuliers. Il doit définir des leviers pertinents sur la concertation citoyenne, pour les autres sous-systèmes.

Attentes sur les usages et les utilisateurs L'acquisition et l'analyse des besoins des utilisateurs et de la connaissance des usages provient **d'un travail préliminaire** à partir des travaux de recherche en amont, **d'interviews avec des praticiens** afin de piloter mais aussi de tester les développements techniques (simulation et stylisation) et l' **observation directe** des usages des géovisualisations produites dans des expérimentations à venir (Jacquinod, 2014; Jacquinod and Joliveau, 2014). Quatre aspects importants sont ressortis des analyses préliminaires :

1. **Fournir une scène 3D complète** : les objets qui doivent apparaître dans la scène sont, en plus des formes simulées (*focus*), les objets de l'environnement, bâtiments existants, routes, végétation, et des données abstraites, i.e. limites de parcelles, des zonages existants (*contexte*). Si les utilisateurs voient une scène incomplète, ils vont avoir des difficultés à comprendre et inférer des connaissances spatiales.
2. **Visualiser des modèles intermédiaires** : il ne s'agit pas uniquement d'abaisser le niveau de détail ou d'ajouter des lignes floues pour représenter des formes géométriques issues de la réglementation : il s'agit de produire des formes géométriques spécifiques et des styles schématiques, permettant aux utilisateurs de comprendre qu'ils visualisent et manipulent des modèles intermédiaires, qui existent pour les aider à réfléchir, mais qui ne vont pas être construits tels quels dans la réalité.
3. **Trouver le bon équilibre entre niveau de détail (*Level Of Detail, LOD*) bas et suffisamment réaliste** : l'environnement des formes simulées ne doit pas être représenté avec trop de détails, afin que seule la morphologie urbaine soit prise en compte par les utilisateurs et considérée comme un tout. Le design précis des bâtiments ne doit pas être le sujet de discussion.
4. **Fournir une visualisation homogène en termes de LOD** : afin de pouvoir se repérer visuellement, le contexte doit être représenté avec plus de détails que le focus ; par contre, la différence de niveau de détail entre les deux ne doit pas non plus être trop grande, et une certaine homogénéité visuelle est attendue : les utilisateurs ne vont pas focaliser sur les détails des bâtiments, alors qu'ils sont en train d'essayer de comprendre et de s'exprimer sur des règles d'urbanisme. L'homogénéité doit permettre de véhiculer l'idée de la morphologie 3D à l'échelle du quartier, et de permettre la lecture des proportions entre les espaces libres et les espaces occupés.

Spécification de quatre styles de rendu Nous décrivons un style photo-réaliste et 3 styles abstraits, i.e. typique, discret et *sketchy* (Figure 3.43) :

- **photo-réaliste** : ce style se compose des propriétés visuelles de la texture de l'ortho-image (couleurs, luminance globale, résolution, etc.) et la méthode pour plaquer cette texture.
- **typique** : ce style se compose des propriétés visuelles typiques de la scène 3D : principalement, il s'agit des couleurs naturelles provenant de l'ortho-image ou des connaissances de terrain sur les matériaux des murs et des toits qui seraient typiques d'une région ou d'un lieu. Les surfaces sont représentées en aplats de couleurs et les arêtes sont représentées par des lignes noires fines.
- **discret** : ce style se compose d'un niveau de transparence et de blanc sur les surfaces, ainsi qu'une représentation légère des arêtes (lignes pointillées ou tiretées, faible épaisseur).
- **sketchy** : ce style provient des techniques de rendu expressifs, explicités dans la section précédente : il est composé de tracés irréguliers au crayon ou au pinceau, dans un mode "esquisse" ou "ébauche". Si on veut tendre vers un style plus artistique, ce style peut être rehaussé en ajoutant des couleurs intenses sur les toits et les murs, afin d'atteindre un style cartoon.

Pour chaque style, les couleurs peuvent varier entre les murs et les toits, pour pouvoir les distinguer aisément.

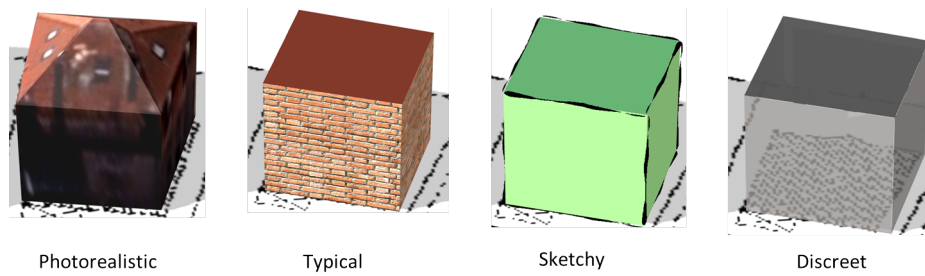


FIGURE 3.43 – 4 styles de rendu possibles (Vinesse, 2016).

Focus+Context Les quatre styles explicités ne vont pas forcément être appliqués à toute la scène 3D visualisée, mais de façon différentielle entre les formes simulées et le reste de l’environnement. Nous définissons le *focus*, l’ensemble des formes simulées, intégré dans un *contexte* représenté par tous les autres objets de la scène. Ces styles devront être visibles quelque soit la position de la caméra et le niveau de zoom : nous proposons donc de tester des oppositions entre style abstrait et style photo-réaliste, ainsi qu’entre styles abstraits.

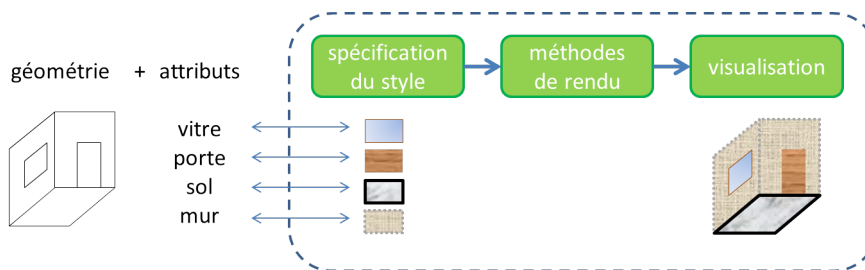


FIGURE 3.44 – Pipeline de rendu 3D (Vinesse, 2016).

Mise en œuvre : co-visualisations de styles possibles pour la concertation publique : stylisation 3D L’objectif de mise en œuvre concernant la stylisation 3D est de fournir une méthode de conception, utilisant un fichier de description du style des données, associé à un ensemble de méthodes de rendu (*Shaders* et textures associées), permettant au moteur de rendu de générer une visualisation de la scène finale. Le pipeline de rendu est similaire à ceux décrits dans les travaux précédents (Figure 3.44) et utilise le modèle de description d’une scène en entrée et le modèle de style défini par des *Symbolizers* adaptés aux arêtes (*linear symbolizer*) et aux faces (*surfacic symbolizer*) (Figure 3.45).

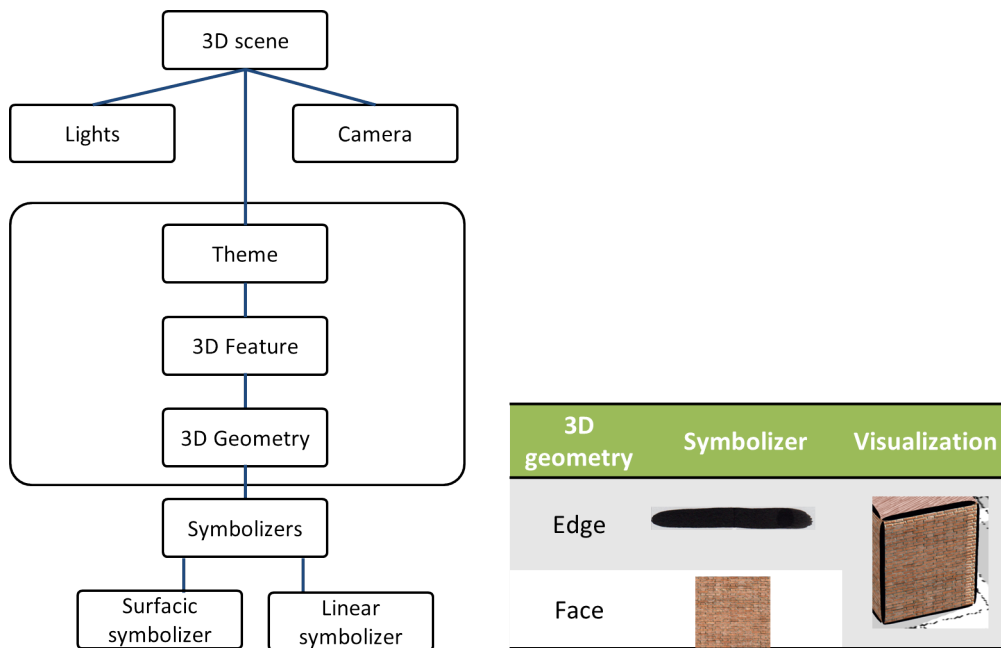


FIGURE 3.45 – Modèle de description des données et modèle de stylisation (Vinesse, 2016).

Sur le modèle de ce qui a été réalisé dans le cadre du projet MapStyle, les *Shaders* sont décrits par des fichiers de métadonnées, listant leurs paramètres et les ensembles de définition possibles. L'application développée utilise la librairie three.js permettant de gérer des scènes 3D dans un navigateur Web, en utilisant le moteur de rendu WebGL. Les fichiers de configuration et de métadonnées sont des fichiers json. L'interface permet d'accéder directement à l'ensemble du paramétrage données par donnée (Figure 3.46). Les premiers tests consistent à tester différentes paramétrisations des quatre styles proposés, en particulier les styles abstraits, pour le rendu du focus et du contexte.

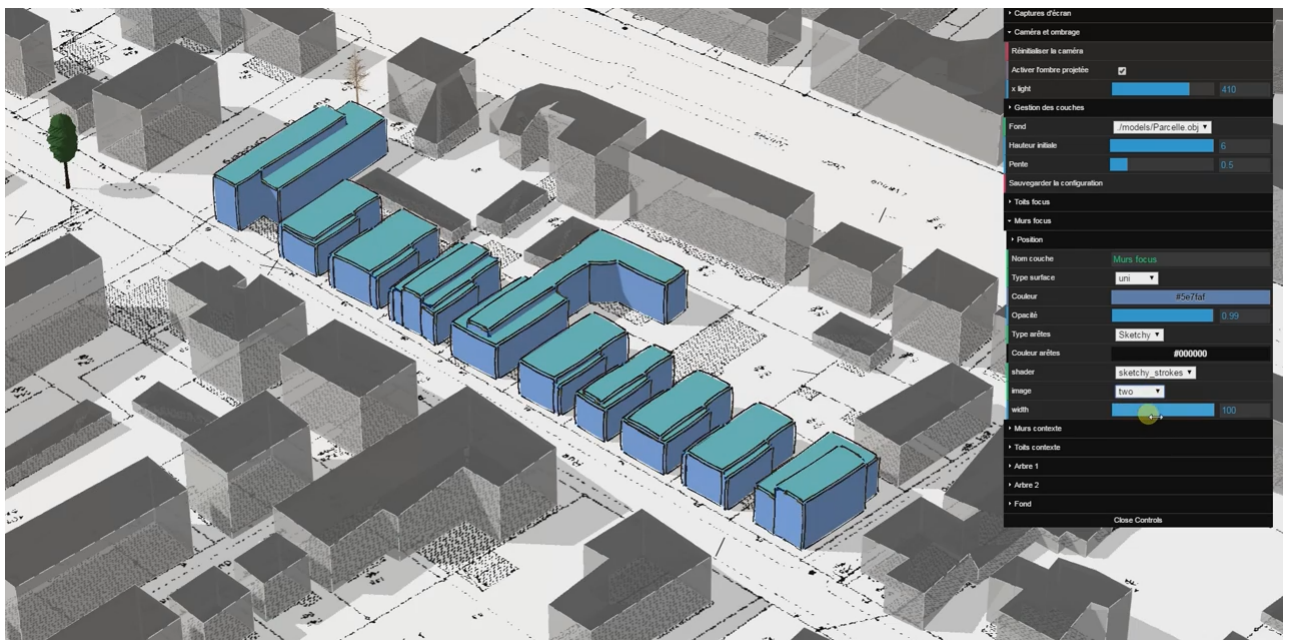


FIGURE 3.46 – Interface de l'application de stylisation 3D (Vinesse, 2016).

La figure 3.47 présente 3 types de combinaisons de co-visualisation de styles : le focus est représenté par un style typique avec des couleurs adaptées au terrain, et un contexte variant en généralisation de styles discrets (blocs transparents généralisés) à un style photo-réaliste.

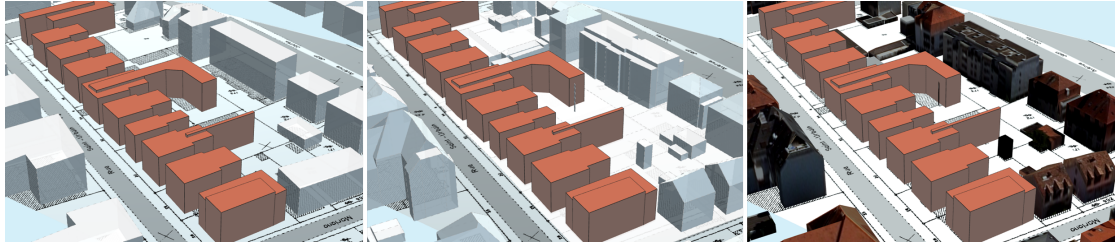


FIGURE 3.47 – Généralisation progressive du *contexte*, avec un *focus* typique : bâtiments discrets (blocs généralisés), image du haut ; bâtiments discrets (préservation de la forme générale), image du milieu ; bâtiments photo-réalistes, image du bas (Vinesse, 2016; Brasebin et al., 2016a).

La Figure 3.48 présente deux exemples d'un style discret, différenciant les murs et les toits (dans l'image du haut) ou non (dans l'image du bas), dans un contexte photo-réaliste.

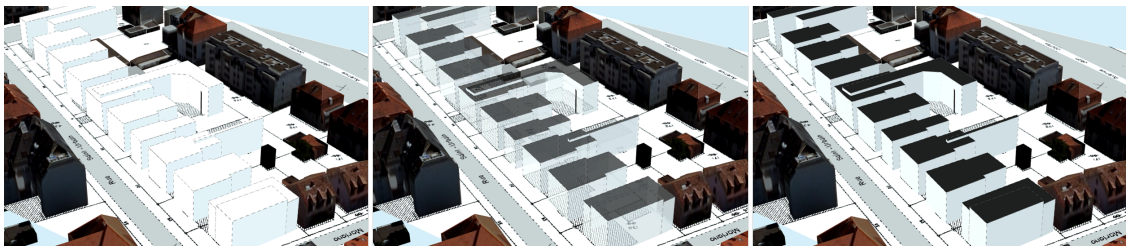


FIGURE 3.48 – Effet de la différenciation des murs et des toits d'un *focus* style discret, avec un *contexte* photo-réaliste : différenciation en haut de l'image, pas de différenciation en bas de l'image (Vinesse, 2016; Brasebin et al., 2016a).

La Figure 3.49 présente différents styles qui peuvent être paramétrés : un focus mixé (murs typiques et toits photoréalistes), un focus sketchy dans un contexte discret et une visualisation des étages sur le focus.

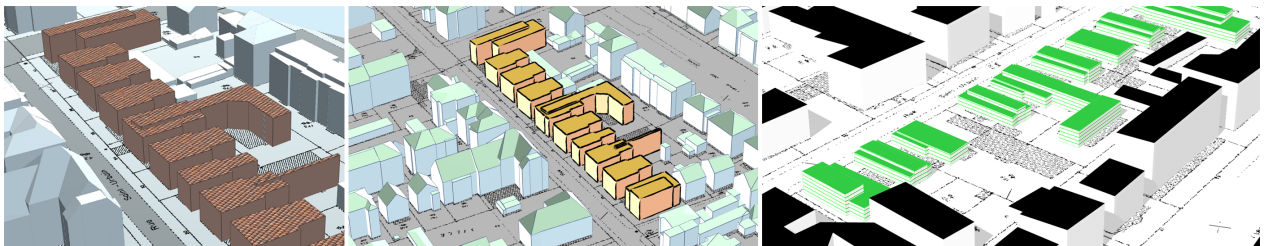


FIGURE 3.49 – Différents styles de co-visualisations possibles (Vinesse, 2016).

Le potentiel de représentation des styles abstraits est important, grâce à la paramétrisation à laquelle nous avons accès : formes, transparence, couleurs, différenciation des objets, etc. De plus, les styles peuvent être mixés dans le focus, afin de mieux considérer les volumes dans un environnement, mais aussi pour bien comprendre les effets de la simulation de la réglementation. Notre objectif est maintenant de contraindre les espaces de paramètres, à l'aide des connaissances acquises sur les usages et les utilisateurs, afin de pouvoir présenter des visualisations à des utilisateurs et les faire réagir, en fonction du cas d'application sélectionné. A partir du moment où des formes à bâtir peuvent être simulées, nous visons de proposer un interface qui permettrait à un animateur de pré-charger une scène, de charger des résultats de scénarios de simulation (en accord avec le sujet de la concertation en cours), et d'afficher les bâtiments dans la scène. Concernant la stylisation, soit elle peut être prévue et prédéfinie en amont en fonction de l'objectif de la concertation, soit elle peut être modifiée pendant la concertation : l'animateur a alors accès au paramétrage et pour mieux faire comprendre l'objectif de la concertation, il peut manipuler le style et le faire passer de très discret à typique, par exemple, lui permettant d'orienter la discussion sur la morphologie des bâtiments ou leur intégration à l'environnement immédiat.

3.4 Modéliser le style comme fonction d'appartenance d'un élément visuel à une famille de légendes/catégories/types de rendu

La notion de 'style topographique' renvoie à une **famille caractéristique de choix de représentations** (cartes, légendes, palettes de couleurs, association d'objets symbolisés, extraits de cartes, etc.), dont il conviendrait de déterminer la fonction d'appartenance. L'hypothèse principale explorée dans le cadre de la thèse de Jérémie Ory, est que cette catégorisation d'un élément visuel à une **famille d'éléments visuels qu'on peut appeler et reconnaître comme un style de rendu**, dépend de l'utilisateur et de sa **capacité de reconnaissance d'un ensemble de caractéristiques visuelles dans l'élément à catégoriser**. L'utilisateur est en effet susceptible d'utiliser différents arrangements visuels dans la carte – arrangements spatiaux des objets cartographiques issus des structures et relations spatiales spécifiques sur le territoire représenté, des choix de modélisation de l'information géographique, des traitements de généralisation et des spécifications de dessin (couleurs, traits, motifs, etc.) – selon sa propre expérience à la fois des cartes topographiques et de l'espace géographique représenté, pour reconnaître des types de cartes topographiques. Il s'agit donc d'une notion partagée, culturellement et liée à l'expérience que nous avons, en tant qu'utilisateurs et usagers, des représentations cartographiques et du territoire que nous investissons.

Dans le cadre de la thèse de Jérémie Ory que j'ai encadrée, co-dirigée par Sara Fabrikant (Uni. de Zürich, GIVA) et Bénédicte Bucher (IGN/LaSTIG/COGIT), l'objectif est de proposer un modèle de style de carte topographique, intégrant les notions de pratiques cartographiques du producteur, utilisateurs de ces cartes et espace géographique représenté, en proposant une approche intégrant des connaissances sur la conception cartographique et sur la perception et la cognition de l'utilisateur. Je résume ici la problématique, la méthodologie et les résultats préliminaires de la thèse. La démarche d'analyses de cartes topographiques IGN et Swisstopo pour la caractérisation visuelle d'un style topographique est décrite dans (Ory et al., 2013, 2014). Les expérimentations et leurs analyses sont présentées dans (Ory et al., 2015b,a). NB : à la date de rédaction de ce mémoire, le mémoire de thèse est en cours de rédaction, je ne présenterai pas les derniers résultats ici (soutenance prévue le 2 Décembre 2016).

Le papier (Ory et al., 2015b) a reçu le Henry Johns Award 2016, décerné par la British Cartographic Society pour "the most outstanding article published in The Cartographic Journal".

Les hypothèses de travail et les objectifs associés sont les suivants :

- Les utilisateurs, à travers leurs différentes expériences cartographiques et une utilisation répétée de cartes topographiques, mémorisent certaines caractéristiques visuelles représentatives d'une famille cartographique, apprenant ainsi la manière dont un espace géographique est représenté par une agence de cartographie : l'objectif dans la thèse est de mieux comprendre les interactions entre les aspects liés à la conception graphique (construction d'un code graphique à partir d'un ensemble de signes graphiques) et les aspects liés à la perception visuelle et à la cognition, en particulier concernant les dimensions mémorisation et reconnaissance.
- Certaines caractéristiques visuelles constituent une signature visuelle et sont utilisées par les utilisateurs pour catégoriser une carte topographique ou une légende et l'affecter à une famille cartographique : l'objectif dans la thèse est de s'interroger sur l'existence d'une telle signature visuelle, en réalisant des expérimentations auprès des utilisateurs, et sa validité pour résoudre des problèmes d'hétérogénéité visuelle en cartographie (entre des échelles différentes, entre des espaces géographiques représentés différemment).

Par ailleurs, les cas des agences nationales de cartographie IGN-France et Swisstopo sont particulièrement étudiés car chacune étant représentative d'une histoire et de pratiques cartographiques de producteurs institutionnels de données et de cartes topographiques, partageant de plus une frontière.

Méthodologie

Jérémie Ory a proposé un cadre unificateur des connaissances permettant de faire le lien entre :

1. l'espace géographique ;
2. les concepts élémentaires de la chaîne de production cartographique : les données géographiques et cartographiques, la légende, les thèmes cartographiques et les lignes de légende associées ;

3. les différents processus d'abstraction cartographique mis en œuvre : la sélection de données, la généralisation cartographique et la symbolisation ;
4. les différents processus de perception et cognition mis en œuvre par un utilisateur pendant la lecture d'une carte : la mémorisation, la reconnaissance.

Son approche consiste en la proposition d'un modèle de style topographique, qui est instancié et validé dans deux cas particuliers de famille cartographique, IGN et Swisstopo, à partir d'entretiens avec les agences de cartographie, d'études de cartes et d'expérimentations auprès d'utilisateurs.

Entretiens et comparaison de cartes

Jérémy Ory a utilisé différentes sources d'informations que sont des entretiens avec des cartographes des agences nationales de cartographie IGN et Swisstopo, une analyse des spécifications des chaînes de production cartographique respectives, et une analyse de cartes IGN et Swisstopo :

1. la comparaison des représentations cartographiques sur un même territoire : la figure 3.51 présente la comparaison des styles topographiques IGN et Swisstopo appliqués au même espace géographique, la ville de Thonon-les-Bains, Haute-Savoie, France.
2. la comparaison de l'évolution des représentations cartographiques dans le temps : la figure 3.50 présente l'évolution au cours du temps des styles topographiques 25K de l'IGN et de Swisstopo.

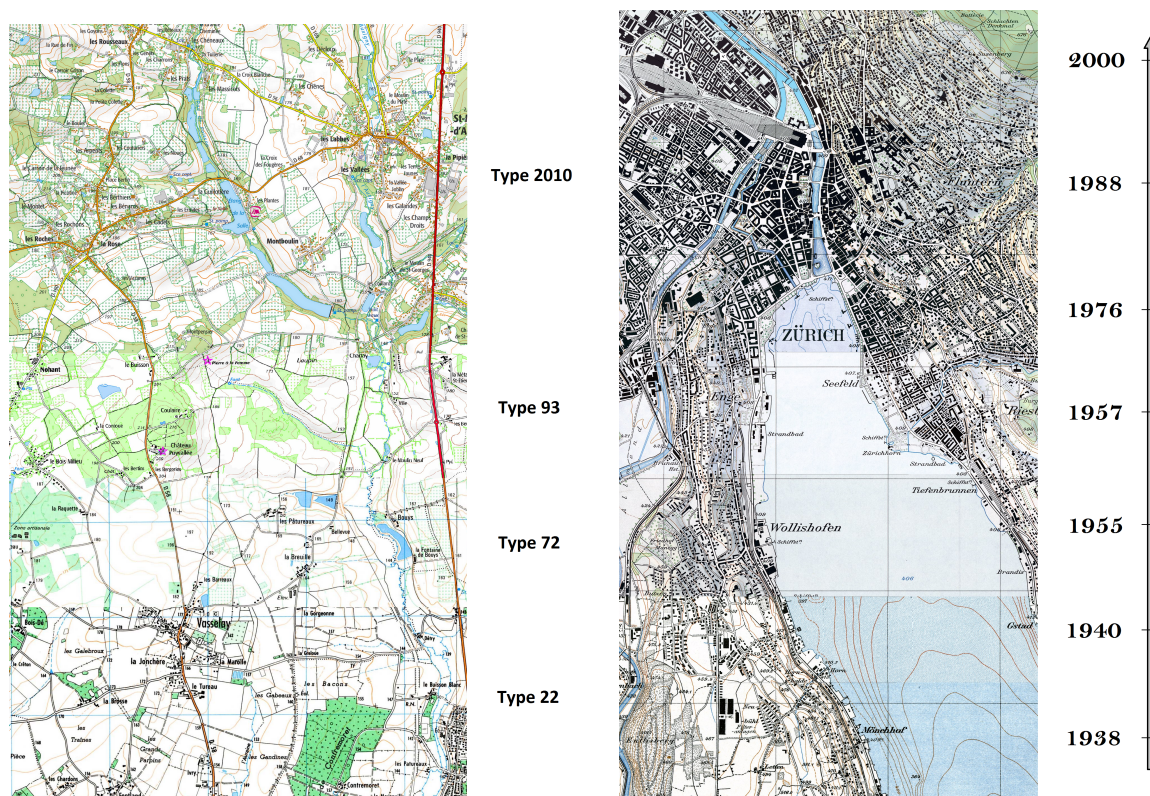


FIGURE 3.50 – Évolution au cours du temps des styles topographiques 25K de l'IGN (à gauche) et de Swisstopo (à droite) (Ory et al., 2013).

Ce travail préliminaire a amené Jérémy Ory à considérer que la notion de style topographique est basée certes basée sur des légendes spécifiques, mais également sur la reconnaissance de traits caractéristiques d'un producteur, au-delà des légendes qui varient dans le temps et dans les espaces, amenant les utilisateurs à pouvoir déduire, qu'une carte, une légende, un extrait de carte, un ensemble de légendes ou de cartes peuvent appartenir à un style topographique donné.

Modèle de 'style topographique'

Jérémy Ory propose un modèle de style topographique utilisant le concept de *signature visuelle reconnaissable d'une famille cartographique*, formée de signes graphiques, prédominants (constance dans la



FIGURE 3.51 – Comparaison des styles topographiques IGN (en haut) et Swisstopo (en bas) appliqués à la ville de Thonon-les-Bains, Haute-Savoie, France (Ory et al., 2013).

représentation graphique) et distinctifs (saillance dans la représentation graphique). Une famille cartographique est donc définie par une signature visuelle : les propriétés visuelles perçues sont structurées sous la forme d'une *signature visuelle perçue* qui sera traitée par la mémoire à court-terme, et, les propriétés visuelles acquises et mémorisées par l'utilisateur au cours d'expériences cartographiques antérieures sont stockées sous forme d'une *signature visuelle mémorisée*. Jérémie Ory souligne que si il existe une proximité et des similarités entre la signature visuelle perçue et la signature visuelle mémorisée, alors le *processus de reconnaissance* peut être déclenché.

Expérimentations utilisateur

Deux grandes expérimentations ont été conduites, afin de tester les hypothèses sur la reconnaissance visuelle des familles cartographiques IGN et Swisstopo, sur l'identification possible des composantes de cette reconnaissance visuelle, et la caractérisation des signatures visuelles des deux familles cartographiques. Le protocole complet est dans le mémoire de thèse (Ory, 2016). L'expérimentation a été publiée dans (Ory et al., 2015b,a).

Les résultats majeurs sont les suivants :

1. Il y a effectivement une bonne reconnaissance visuelle des familles cartographiques, cela valide le concept de famille cartographique. Par contre, il faut noter que cette reconnaissance est fortement influencée par la langue des toponymes, l'espace géographique représenté et les spécifications de légende.
2. Il y a effectivement identification et classification des signes graphiques reconnus de chacune des familles cartographiques, cela valide le concept de signature visuelle et permet de caractériser chacune des signatures visuelles des deux familles cartographiques.

Cas d'application : aide à la rédaction cartographique

L'instanciation du modèle de style topographique proposé, à partir des connaissances sur les familles cartographiques IGN et Swisstopo au 1 :25ème, permet d'exploiter, de manipuler et de contrôler différentes caractéristiques visuelles de ces styles, afin de résoudre des problèmes de rédaction cartographique. En particulier, deux cas d'application nous intéressent :

1. Les choix de représentation cartographique varient selon les échelles de représentation disponibles, rendant le repérage visuel et la compréhension du territoire difficiles lorsque l'on navigue entre les échelles : il serait intéressant d'avoir une représentation cartographique continue à travers les échelles.
2. Les choix de représentation cartographique varient de part et d'autre d'une frontière géographique, selon les agences nationales de cartographie en charge du territoire : il serait intéressant d'avoir des propositions pour la production de cartes topographiques, du point de vue d'une agence de cartographie, pour une zone frontalière.

Style topographique continu à travers les échelles. La difficulté est d'avoir des représentations cartographiques différentes entre les échelles de représentation, dans le Géoportail par exemple. Lors de la navigation dans une pyramide d'échelle, afin de faciliter le repérage visuel et la lecture des cartes, il est nécessaire de résoudre ce problème d'hétérogénéité visuelle entre échelles. Il y a tout d'abord une discontinuité visuelle due aux différents traitements de généralisation à différentes échelles qui est le constat de base de la thèse de Marion Dumont au COGIT, qui vise à générer des échelles intermédiaires cohérentes avec les échelles existantes. Dans le cadre de notre problème, il s'agit plutôt d'utiliser la signature visuelle connue d'un producteur de cartes, afin de proposer des représentations cohérentes et continues entre elles. La proposition consiste à utiliser la composition de la signature visuelle à différentes échelles.

Style topographique continu à la frontière entre deux pays / deux producteurs de cartes
La difficulté est d'avoir des représentations cartographiques différentes de part et d'autre d'une frontière géographique, due à la responsabilité partagée des territoires entre agences nationales de cartographie (en tous cas, en Europe). Ceci implique donc une hétérogénéité visuelle de part et d'autre d'un tracé linéaire, due non seulement à l'utilisation de données cartographiques différentes, mais également à des pratiques de représentation (généralisation, symbolisation) différentes. Dans notre cadre, il s'agirait donc de proposer un style topographique continu, soit en utilisant le point de vue d'un producteur ('j'applique le style Swisstopo sur les territoire suisse et français, si je regarde une frontière franco-suisse'), soit un point de vue mixé ('j'applique un mix des styles Swisstopo et IGN, si je regarde la frontière franco-suisse'). La proposition consiste donc d'une part à appliquer la signature visuelle d'un producteur de cartes sur des données d'un autre producteur, d'autre part de proposer une combinaison de deux signatures visuelles.

Conclusion Cette proposition de modèle de style nous permet d'avancer vers l'imbrication des effets visuels des différents processus en amont du rendu effectif de la carte (généralisation, symbolisation) permettant de rendre saillantes diverses structures spatiales, par leur représentation graphique résultante des processus de généralisation et de symbolisation. cela nous permet d'avoir un nouvel objet sur lequel évaluer la qualité de la représentation, plutôt que de le faire sur toute la carte, au risque de devoir qualifier des relations entre objets qui ne sont pas perçus ou rendus suffisamment visibles pour l'utilisateur.

Applications

Les codes des applications citées sont disponibles en Open Source sur :

- MapStyle sur GeOxygene <https://ignf.github.io/geoxygene/documentation/index.html>
- Plu++ <https://github.com/IGNF/PLU2PLUS>.

Le code de ma thèse a été repris et transféré au Service des Développements à l'IGN, dans l'application Colorado utilisée en interne (Lafay et al., 2015).

Chapitre 4

Conclusion et perspectives de recherche

Mes travaux de recherche ont permis de formaliser un ensemble de connaissances en sémiologie graphique et en géovisualisation, en particulier sur la couleur et son utilisation en cartographie, et, sur la spécification du style de rendu, en tant que spécification du dessin des objets cartographiques (ex. : avoir un tracé simulant un dessin à l'encre) et approche d'une fonction d'appartenance à un type de rendu reconnaissable (ex. : avoir une carte artistique type aquarelle, ou une carte topographique type suisse). La description des espaces de paramètres pour le rendu de ces styles a permis de pouvoir tester des explorations de ces espaces de paramètres dans différents contextes d'utilisation. La décorrélation de la spécification du style et de l'implémentation des méthodes de rendu, permet d'obtenir un pipeline de rendu générique, pouvant être encore étendu : la description de comment les géométries vont être rendues (style) et le processus-même du rendu de ces géométries sont séparés. Ce modèle a ainsi été implémenté et expérimenté pour intégrer des techniques de rendu expressif et de rendu ortho-photo-réaliste, afin de produire de nouvelles représentations cartographiques, issues de différentes sources d'inspiration (artistique, cartographie topographique européenne, imagerie).

Afin de poursuivre ces travaux, le modèle de style doit être étendu, voire repensé, afin d'être générique et de permettre :

1. d'intégrer une grande variété de données géographiques hétérogènes (bases de données vecteurs, ortho-images, modèles numériques 3D, images, etc.) mais également d'autres types de données (thématiques, sources historiques, etc.) ;
2. d'acquérir et extraire des connaissances dans des images sources pour pouvoir proposer des bases d'exemples de palettes de couleurs, de textures et de styles (pour une géométrie donnée ou pour une carte) à l'utilisateur ;
3. de décrire et d'acquérir un catalogue de méthodes de rendu associées à des bases de textures ou autres connaissances nécessaires au rendu, et adaptées à des données géographiques ;
4. de spécifier et orchestrer le rendu via ses "descripteurs" que sont la légende et le style ;
5. de prévoir comment l'orchestration et l'intégration de données pré-traitées et/ou de pré-traitements à la volée seront nécessaires ;
6. de mettre en œuvre des méthodes pour l'interaction (homme-machine ou machine-machine), en spécifiant les interactions et tâches utilisateur/système possibles ;
7. d'adapter le pipeline de rendu, et donc les rendus et les représentations à des supports variés (Smartphones, tablettes, casques de réalité virtuelle, lunettes de réalité augmentée, etc.).
8. ...pour répondre à un ensemble d'usages de l'information géographique et des représentations graphiques de l'information géographique, restant à identifier et à caractériser.

Pour répondre à ces objectifs, les pistes de recherche et d'expérimentation suivantes sont identifiées :

- Interpolation de styles pour l'intégration visuelle de données et représentations hétérogènes.
- Géovisualisation cognitive et modèles d'interaction pour la géovisualisation dynamique.
- Exploitation et expérimentation du modèle de style pour différents usages : analyse géo-visuelle de dynamiques géo-historiques, concertation citoyenne autour de l'aménagement de l'espace urbain, diffusion grand public de phénomènes physiques complexes et incertains.

Limites du modèle de style

La stylisation, telle qu'elle est décrite en rendu expressif, inclue une étape préalable de simplification des données (diminution du niveau de détail) pour pouvoir contrôler les effets de la stylisation. Le style en cartographie est porté par des géométries "cartographiques" (issues de données géographiques) et par des géométries de support à la stylisation (ex. : hachures dans un versant) permettant de simuler le terrain (sans réalité topographique). Cela signifie que dans le pipeline de rendu, il est nécessaire de savoir produire :

1. des données cartographiques adaptées à la stylisation future : dans le processus de production cartographique classique, il s'agit de données cartographiques générées pour le niveau de généralisation attendu pour le style visé, nécessitant de connaître au préalable les effets de la stylisation pour permettre de définir des contraintes de préservation de lisibilité en amont.
2. des géométries de support de dessin, à partir de données géographiques ou cartographiques ou de connaissances issues de ces données, qui n'existeront que le temps du rendu.

La construction de ces géométries, en cours du rendu, nécessite d'être spécifiée dans la description du style et décrit, par exemple, comme des **services de génération de géométries (données cartographiques ou autres données) pour la stylisation**.

Il serait important de pouvoir intégrer cette étape de génération de géométries, en particulier la généralisation cartographique, dans le modèle de style, afin non seulement de sélectionner le bon niveau de généralisation des données en entrée, mais également de pouvoir relancer une phase de généralisation cartographique, si le résultat de la stylisation est incorrect (perte d'objets ou de relations spatiales dans la carte, par exemple), ou même lancer une généralisation en cours de rendu sur des géométries qui auraient été créées pendant l'étape de stylisation.

De plus, le style, tel qu'il est décrit dans l'ensemble des travaux présenté est valide, a priori, pour un niveau de généralisation des données cartographiques en entrée, et donc pour une gamme d'échelles de représentation donnée. La boucle de rétroaction généralisation-stylisation a été faite de façon implicite : nous avons toujours choisi des données cartographiques en entrée, adaptées à l'échelle de représentation visée (pour faire une carte style Cassini, nous avons choisi des données cartographiques au 100K) et au type de stylisation visé (pour l'aquarelle, nous avons choisi des données cartographiques au 100K pour devancer les problèmes dus aux effets de dilution). Dans le cadre des travaux présentés dans ce mémoire, la validité d'un style n'a pas été testée hors de cette gamme d'échelles et il n'est pas possible de garantir sa stabilité lors d'une navigation multi-échelles. Nous avons abordé ces aspects avec Cécile Duchêne (IGN/LaSTIG) concernant l'adaptation des légendes au changement de zoom ou de pan, ainsi qu'au changement de support (Duchêne et al., 2009; Duchêne et al., 2011) et souligné la variation dans la perception de la qualité d'une légende cartographique. Cette stabilité de la légende et du style fera l'objet de travaux dans le cadre du projet ANR MapMuxing.

Pour **intégrer la généralisation cartographique dans le modèle de style**, outre la mise en place de services de génération de géométries, il faudrait pouvoir :

1. annoter un style avec l'information de généralisation des données en entrée, requise, garantissant la préservation des objets et des relations (limite de validité du style), c'est-à-dire spécifier les contraintes de préservation de la lisibilité (ce que la généralisation garantit).
2. qualifier le résultat de la stylisation au regard des contraintes de préservation de la lisibilité classiques.

Ainsi, cela permettrait d'intégrer des phases itératives de généralisation-symbolisation-stylisation. Pour se faire, il faudrait envisager d'avoir un processus de plus haut niveau, qui définit les phases itératives en fonction des résultats de la qualification, et applique les styles adaptés en fonction de la généralisation des données et peut renvoyer à une étape de généralisation nécessaire, en cours de rendu. Pour l'instant, il est impossible de décrire à ce stade des pré-processus de traitement de la donnée en entrée (qu'elle soit brute, simulée ou déjà généralisée), sur laquelle appliquer ensuite une stylisation.

Pour finir, le modèle de style, en mode spécification du dessin, a été expérimenté, en définissant les thèmes cartographiques à représenter et en instanciant des paramètres de symbolisation et de stylisation, de façon implicite, c'est-à-dire sans aller chercher automatiquement les thèmes et sous-thèmes, ainsi que leurs relations inter- et intra- définis dans la légende. Pour l'instant, une légende est effectivement adaptée au rendu cartographique 2D, c'est à-dire que la liste des thèmes et sous-thèmes et les relations sémantiques (association, ordre, différence) sont prédéfinis : il faudrait voir ce que ce type de description des thèmes

(plus que des objets) à représenter, et des relations sémantiques à préserver, implique dans les contextes d'une géovisualisation plus dynamique, ou de la 3D. Il serait donc pertinent d'avoir en plus du fichier de spécification du style (i.e. comment rendre les géométries?) :

- une **spécification de la "légende"** (sens large) : en cartographie classique, il s'agit de la description des relations sémantiques entre les thèmes cartographiques. Néanmoins, il devrait être étendu à tout autre caractérisation des couches d'informations à représenter, à mettre en relation et dans quel type de relation : par exemple, est-ce que c'est à cet endroit que l'on pourrait décrire en partie la gestion des occlusions en 3D ?
- une **méthode d'orchestration générale** qui dit quoi, quand, dans quel ordre et itérativement enclencher sur quoi, et qui sait comment accéder aux différents services, métadonnées de description et bases de données (géographiques, cartographiques, méthodes de rendu, et textures/effets).

Intégration visuelle et exploration de styles topographiques - Interpolation de styles et de paramètres graphiques

Afin de naviguer dans les représentations cartographiques, toujours pour répondre à un besoin d'adaptation aux besoins et préférences des utilisateurs, les travaux présentés permettent d'envisager des possibilités de navigation continue entre diverses données géographiques et représentations graphiques, pour fournir :

1. des méthodes pour l'intégration visuelle des données et représentation hétérogènes.
2. des styles topographiques plus variés, plus diversifiés, nouveaux, combinés, etc., répondant à divers problèmes de représentation.
3. des outils pour explorer ces styles topographiques sur des données fournies ou choisies par l'utilisateur.

En particulier, dans le travail de thèse de Charlotte Hoarau, un continuum entre deux types de représentations graphiques (abstraction cartographique des données vecteur symbolisées et ortho-imagerie) a été proposé comme support à la navigation entre des représentations variées d'un même espace géographique, permettant ainsi de proposer un continuum de styles topographiques potentiellement intéressants pour les utilisateurs. Cette proposition utilise une **exploration des espaces de paramètres graphiques**, à l'aide d'une interpolation des couleurs et des textures pilotée par le degré de photoréalisme attendu. Ce travail montre la possibilité de rendre générique le modèle de style utilisé, à partir du moment où on est capables de contrôler et d'aligner sémantiquement les espaces de paramètres des données ou représentations en entrée, et de proposer des méthodes pour **interpoler ces espaces de paramètres**. Contrôler l'intégration visuelle de données hétérogènes, de façon continue et homogène, permettrait de fournir des **supports à la navigation dans les données et les représentations**. Le travail de thèse de Jérémie Ory permet par la formalisation de la catégorisation d'une carte ou d'une légende à une famille de cartes, de spécifier la notion de style topographique, permettant de caractériser les représentations cartographiques existantes d'une famille, mais également de spécifier de nouvelles représentations graphiques de cette famille. Poursuivre sur la formulation du problème sous la forme de la spécification d'une fonction d'appartenance d'un élément de représentation graphique à une famille de représentations permettrait d'explorer ces familles et des distances entre familles.

Le modèle de style proposé pourrait être étendu pour l'intégration visuelle d'autres données et d'autres représentations hétérogènes, afin de tester et valider sa généralité. Déjà dans le cadre du projet ANR MapStyle et donc des deux thèses précitées, le problème de l'exploration des styles topographiques possibles, est envisagé communément comme une interpolation entre des styles existants basée sur des interpolation des espaces de paramètres graphiques. Dans la suite, différentes catégories de problèmes sont identifiées, permettant ensuite de reformuler le problème de la modélisation du style comme une interpolation entre styles.

Catégories de problèmes identifiées et pistes envisagées

Navigation continue entre deux échelles de représentation

Entre deux échelles de représentation dans un géoportail, les cartes sont généralement représentées avec des légendes différentes, et des données généralisées de façon différente. La notion de style permettrait de "réconcilier" les problèmes de repérage visuel qui perturbent l'attention visuelle et la compréhension,

lors de la navigation entre échelles spatiales, en intégrant, en combinant ou en re-utilisant les résultats des travaux de recherche initiés dans le cadre de la thèse de Marion Dumont (Dumont et al., 2015, 2016). Ces sujets feront l'objet de travaux spécifiques dans le cadre du projet ANR MapMuxing, questionnant la navigation continue entre échelles et styles, utilisant des techniques d'interpolation de paramètres graphiques pilotées par un niveau d'abstraction attendu (généralisation, symbolisation, stylisation), que nous aborderons avec Guillaume Touya (IGN/LaSTIG).

Si on a un style 1 à une échelle inférieure, et un style 2 à une échelle supérieure, on pourrait trouver des moyens de proposer un style intermédiaire pour une échelle intermédiaire, ou faire évoluer un même style pour une pyramide d'échelles. La complexité ici est qu'un style topographique identifié est caractérisé pour une échelle donnée : le niveau de généralisation, la forme et les structures spatiales des objets caractérisent une signature visuelle du style topographique (Cf. thèse de Jérémie Ory). La notion de style topographique est donc liée à une gamme d'échelles autour de l'échelle de représentation des données cartographiques utilisées : il est donc nécessaire de se poser la question de l'**évolution de la signature visuelle à travers de grands sauts d'échelle**, en particulier dès que la généralisation entraîne des modifications de forme et de structure spatiales caractéristiques. De la même façon, la question se pose sur les couleurs utilisées : un choix de couleurs est évalué pour un jeu de données, et on ne sait pas ce qu'il advient de la qualité de la palette de couleurs utilisée, lors d'un changement d'échelle spatiale : les quantités de couleurs en jeu, et les contrastes spatiaux de couleurs sont remis en question. Pour l'instant, même **en maintenant les caractéristiques d'une signature visuelle à travers les échelles** (stabilité/constance de la signature dans l'espace et dans le temps ?), il est quand même possible de perdre la cohérence visuelle. Une piste est de trouver quels sont les objets et structures spatiales à conserver, soit en suivant les règles imposées de la généralisation (issues des contraintes de préservation de la lisibilité et des structures spatiales) sur les objets cartographiques pouvant servir de pivots visuels, soit en mettant en œuvre une étape itérative de généralisation-symbolisation-stylisation pour préserver les structures spatiales et leur(s) style(s) au changement d'échelle.

Il est donc nécessaire de trouver des méthodes pour, d'une part évaluer la validité d'une signature visuelle, d'autre part évaluer sa stabilité lors du changement d'échelles.

Navigation continue à une même échelle de représentation

... entre deux types d'espaces géographiques différents, même schéma de données Pour valider la généralité d'un style, et donc son applicabilité sur n'importe quel jeu de données de l'utilisateur, il est nécessaire de se poser la question de la validité d'un style sur un jeu de données complètement différent de celui sur lequel il a été évalué, en termes de **caractérisation de l'espace géographique représenté** : ex. : style évalué sur un espace urbain en zone côtière, à appliquer sur une zone de montagne. Il est nécessaire de pouvoir apporter à l'utilisateur l'expertise sur la possibilité d'appliquer un style sur ses données.

La notion de style est fortement dépendante de l'espace géographique représenté, puis des données géographiques sélectionnées, de leur présence effective dans la zone représentée, et de leurs proportions et agencements spatiaux dans la carte. Même s'il est évident de dire qu'un style historiquement construit pour un pays de montagnes et de lacs est inapplicable pour représenter le Sahara, il est nécessaire de pouvoir décrire et caractériser les gammes d'espaces géographiques pouvant être représentés par un style. Encore une fois, il est nécessaire de trouver une mesure de la validité d'un style autour d'un **espace géographique typique** à représenter avec un style.

La notion de style concerne d'une part la spécification et le rendu effectifs (est-ce que la donnée existe pour que je puisse effectivement la rendre de telle façon ?), d'autre part sa capacité à être reconnu reconnaissable comme tel : la mesure de la validité d'un style s'appuierait donc sur deux propriétés, être applicable et être reconnaissable. Cela rejoint la question de la sélection et de la présence de certains thèmes dans une carte : si le style suisse se devine essentiellement par la représentation de ses montagnes, est-ce qu'il est reconnaissable sur des données représentant un espace géographique de type plaine ou zone côtière.

...entre deux représentations cartographiques du même espace géographique Sur un géoportail, on visualise des données topographiques et leurs représentations cartographiques associées, éventuellement issues de différents producteurs de données. A la frontière entre deux pays, ayant chacun une

agence nationale de cartographie responsable d'un territoire national, il est possible d'observer un accolement de deux représentations cartographiques complètement différentes. Certains géoportails gèrent à la main et retravaillent la légende, pour homogénéiser les rendus progressivement, de part et d'autre de la frontière.

Grâce au modèle de style, il serait pertinent de considérer, entre deux représentations cartographiques (issues de deux jeux de données différents), la conservation d'un style topographique sur et au-delà d'une frontière, afin de **préserver une forme de "point de vue" sur les données** (i.e. adopter le style 1 et l'appliquer au jeu de données 2), et pouvoir passer selon le besoin, à l'autre point de vue. Une deuxième solution consiste à **proposer un style intermédiaire pour la représentation de la frontière entre les deux styles**, que les producteurs pourraient sélectionner à l'aide d'un continuum entre deux cartes similaire à celui proposé par Charlotte Hoarau. La difficulté ici est de devoir gérer des espaces de paramètres similaires sur les variables visuelles, mais différents sur les **sélections de données cartographiques, et les relations sémantiques propres à deux légendes différentes** (cela rejoint un problème d'alignement de schémas et de légendes).

... entre deux représentations hétérogènes du même espace géographique J'appelle représentations hétérogènes ici, données et modèles de données géographiques : ortho-image et vecteur, Lidar et vecteur, etc. Dans la thèse de Charlotte Hoarau et dans le post-doctorat d'Antoine Masse, deux pistes ont été explorées pour combiner deux types de données hétérogènes, visuellement, c'est-à-dire en jouant sur des paramètres purement graphiques décrits par le style et des méthodes de rendu adéquates. Les deux expérimentations utilisent le même modèle de style qui a été étendu pour avoir des capacités de description du style pour des ortho-images, en s'appuyant sur des connaissances sur l'extraction de couleurs naturelles dans une ortho-image, et pour chacun soit en manipulant un degré de photo-réalisme dans l'abstraction cartographique, soit en choisissant un point de vue purement "photo-réalisme" ou un point de vue "abstraction cartographique" appliqué à des données différentes (géo-visualisation littorale, abstraite ou photo-réaliste, sur données LiDar+marée).

Utiliser des données géographiques hétérogènes permet d'une part de **mélanger des propriétés visuelles des deux données**, permettant d'améliorer l'efficacité et la personnalisation de la représentation finale, d'autre part de **jouer également sur le niveau de précision de ces données pour produire un effet de réalisme perçu**, due à une grande précision de certaines données se combinant avec une abstraction nécessaire de l'information pour un meilleur résultat, mais également pour **simuler une dynamique sur l'espace**. Il faut poursuivre ces expérimentations et extensions du modèle de style :

- en ajoutant d'autres données géographiques : le continuum se fait entre deux sources de données hétérogènes, on peut ajouter un troisième type d'hétérogénéité (ortho, carte, nuage de points), ou d'autres objets d'un même type (plusieurs ortho-images à différents pas de temps).
- en manipulant d'autres type de rendus : Charlotte Hoarau a déjà testé son continuum entre cartes topographiques conventionnelles et cartes topographiques artistiques et ortho-image. Un continuum combinant les résultats sur la géovisualisation littorale (vecteur, ortho-image, Litto3D) permettraient d'étendre les capacités de navigation et de personnalisation des données, ainsi qu'améliorer la perception et la compréhension d'un phénomène dynamique sur ce territoire.
- en manipulant des propriétés visuelles de haut niveau ou des styles différents : piloter l'interpolation par le degré de photo-réalisme ou d'abstraction cartographique classique. Le changement de point de vue sur le style pourrait être un paramètre du problème.
- en ajoutant la question du temps : il est possible de manipuler des ensembles d'images à différents pas de temps sur une zone, et utiliser l'image dans une abstraction cartographique, pour visualiser un type d'objets cartographiques qui évolue dans le temps (végétation saisonnière, avancement des travaux d'un chantier, etc.), ou un espace géographique qui évolue dans le temps.

Changement de paradigme : basculer 2D/pseudo 3D/3D

En termes d'intégration visuelle de données et modèles de données, il est important de pouvoir :

- combiner représentations 2D et 3D dans la même scène, non seulement pour co-visualiser des données (le plan cadastral, des trajectoires de piétons ou la cartographie des réseaux d'énergie dans un modèle 3D, entre autres).
- basculer d'une perspective 2D à une perspective 3D d'une même scène, avec éventuellement des styles de rendu différents.

Outre les problèmes d'IHM, l'intégration visuelle des données est similaire aux problèmes identifiés précédemment : il faut co-visualiser des données hétérogènes (avec quel(s) style(s) de représentation adapté : tout mettre dans le même style ou préserver un style différent pour mettre en valeur une donnée ou un phénomène?). Il faut néanmoins être capable de spécifier les styles topographiques explorés précédemment dans le paradigme 3D. La logique de scène vs. layers nécessite de manipuler des paramètres graphiques globaux sur la scène (propriétés de la caméra, et propriétés de blending pouvant être différents) et non uniquement sur des couches élémentaires.

Le modèle de style existant doit évoluer pour permettre de spécifier certaines caractéristiques 3D, et doit être associé à une méthode d'orchestration générale qui intègre également les spécificités du rendu (problème du modèle de style et de la méthode d'orchestration à étendre). Par ailleurs, comment étendre les connaissances acquises et formalisées en 2D à la 3D (sémiologie graphique, spécification de styles, méthodes de rendu)? Le passage des méthodes de rendu de la 2D à la 3D, comme d'un rendu statique à un rendu dynamique, doit également pouvoir être spécifié. Le modèle doit être étendu afin d'intégrer des bases de textures et d'effets et des méthodes de rendu restant à décrire dans des catalogues, par exemple.

Vers un modèle (d'interpolation) de style flexible

Afin d'explorer largement des espaces de paramètres (que ce soit les paramètres d'un style, ou, un ensemble de styles), nous avons besoin de re-formuler le problème du style, afin d'intégrer les verrous identifiés auparavant, et de permettre d'obtenir une grande flexibilité et variabilité dans les résultats. Pour cela, nous avons collectivement commencé à travailler sur l'interpolation de paramètres pour aider à l'exploration de styles.

Il est nécessaire de pouvoir :

1. gérer l'alignement des espaces de paramètres : nous avons testé sur des cas simples où les espaces de paramètres s'alignent aisément (ensemble commun de variables visuelles). L'absence d'un paramètre peut être remplacé par une valeur par défaut. La résolution de l'alignement peut poser un problème. En cas d'ensembles de paramètres non facilement alignables, il faudrait, à l'instar de la proposition de Charlotte Hoarau, définir un espace de paramètres commun à partir duquel réaliser l'interpolation, ou s'en servir comme une série de points d'inflexion pour piloter l'interpolation.
2. déterminer, tester des méthodes pour interpoler les espaces de paramètres graphiques, pour un paramètre ou une combinaison de paramètres. Nous avons commencé par travailler sur la couleur, puis sur des combinaisons texture-couleur-transparence (Charlotte Hoarau) : il serait intéressant de rajouter de poursuivre sur les textures et les autres variables visuelles.
3. définir la séquence et l'ordre d'interpolation entre paramètres : cela dépend de ce qui drive l'interpolation : cela peut être une propriété visuelle de haut niveau (degré de photo-réalisme perçu qui a été définie de façon implicite dans la thèse de Charlotte Hoarau, un ensemble de contraintes cartographique, une contrainte exprimée par l'utilisateur, etc.).
4. spécifier l'ensemble de contraintes adapté (par paramètre) pour contraindre éventuellement les interpolations, pour respecter les relations spécifiées dans la légende, les préférences éventuellement exprimées d'un utilisateur, afin de visualiser l'interpolation dans une interface homme-machine où on pourrait choisir d'infléchir ou non, à certains endroits, en visualisant le résultat.
5. évaluer le résultat à tout moment de l'interpolation : les indicateurs existants sur les contrastes de couleurs, qu'il faudrait re-spécifier dans ce contexte précis, montrent qu'ils sont nécessaires pour améliorer la qualité de la visualisation finale (Cf. Charlotte Hoarau) mais qu'ils ont des limites sur l'évaluation globale des représentations intermédiaires. Nous cherchons donc de nouvelles méthodes d'évaluation.

Pistes de recherche envisagées

1. **Formalisation et implémentation d'un style flexible pour la géovisualisation nD.** Avec Mathieu Brédif (IGN/MATIS), une idée est d'exploiter la capacité des graphes acycliques pour décrire la spécification du style et l'implémentation du rendu (une interpolation entre deux styles peut se re-écrire en un blending entre deux résultats de rendu, par exemple), ou comment contrôler l'interpolation de styles : si les espaces de paramètres s'alignent (par exemple, entre deux styles IGN, et deux représentations de routes décrites par couleur, épaisseur), une interpolation entre deux styles, est un ensemble d'interpolations entre chaque paramètre de style (cas Charlotte Hoarau) ; si les espaces de paramètres ne s'alignent pas (par exemple, le cas d'une interpolation entre

un rendu expressif de route et un rendu basique comme dans le cas précédent), il est nécessaire de les approcher, en considérant des styles intermédiaires, qui vont servir de pivots à l'interpolation (blending). Il faut donc trouver des opérateurs de rendu intermédiaires pour la création de tels styles intermédiaires. Cette approche permettrait également d'avancer sur l'exploration des espaces de palettes de couleurs. Pour finir, cela permettrait de contrôler différentes méthodes de rendu lors de la navigation pour palier à des problèmes de performance (switcher entre qualité haute/basse du rendu dans le temps du rendu).

2. **Expression de contraintes cartographiques.** Nous poursuivons par ailleurs nos travaux sur l'expression de contraintes pour la cartographie pour l'interpolation entre deux paramètres ou pour une combinaison, et faire le lien avec une ou des propriétés visuelles de haut-niveau qui drivent l'interpolation. L'optimisation du choix des couleurs, donc de l'exploration de l'espace des (palettes de) couleurs, reste un sujet d'actualité. Des travaux sont en cours avec Bertrand Duméniou, ainsi qu'avec Nicolas Mellado (IRIT) sur ces questions.
3. **Complexité visuelle.** Un agenda de recherche a été publié avec Guillaume Touya et Charlotte Hoarau (Touya et al., 2016) sur l'utilisation de mesures de complexité visuelle pour détecter des zones trop surchargées (donc à modifier/retoucher/simplifier/éviter de styliser) ou trop peu complexes (niveau de qualité de la représentation attendue : une carte IGN est plus complexe visuellement qu'une carte Google Maps). Il en ressort notamment qu'une seule mesure ne peut pas saisir tous les aspects de la complexité des cartes et que la combinaison de mesures devrait être étudiée (Plus de détails dans la section suivante).

La description des catégories de problèmes identifiées précédemment permettrait d'instancier cette modélisation du problème. Des expérimentations sont donc en cours sur certains aspects du problème et pourront être testées dans le cadre du projet ANR MapMuxing (2013 - 2018) sur la mise en œuvre de techniques de multiplexing pour gérer des navigations multi échelles spatio-temporelles, et dans le cadre du projet interne GeoVIS au LaSTIG pour la formalisation du problème du style sous forme de graphes, et des expérimentations sur des méthodes de rendu plus spécifiques telles que le rendu basé image (Brédif, 2014).

Géovisualisation cognitive et modèles d'interaction pour la géovisualisation dynamique

*Cette partie reprend des questionnements décrits dans (Christophe, 2013, 2014), à partir de la collaboration avec Sara Fabrikant (Fabrikant et al., 2013), puis avec Marlène Villanova-Oliver, Amy Griffin, Arzu Cöltekin, respectivement dans le cadre de nos implications dans des commissions et groupes de travail du GDR MAGIS, de l'ICA et de l'ISPRS : respectivement, action prospective **GDR MAGIS Cartographie & Cognition** démarrée en 2013, reconduite en **GDR MAGIS Géovisualisation et Cognition** en 2016 avec Marlène Villanova-Oliver (LIG/STEAMER)(2013-2016, reconduction 2017-2020), commission **ICA Cognitive Geovisualization** fondée par Sara I. Fabrikant, Université de Zürich, Suisse et Amy Griffin, University of South Wales, Australie, dont je suis co-chair depuis 2015, et le groupe de travail **ISPRS Geovisualization and virtual reality** dont Arzu Cöltekin est chair et dont je suis co-chair depuis 2016.*

S'adapter aux besoins, aux préférences de l'utilisateur ainsi qu'à ses capacités percepto-cognitives tout en préservant la qualité des représentations cartographiques fournies est un défi pour la recherche en géovisualisation. Cette adaptation repose d'une part sur des capacités de proposition de méthodes variées de conception de représentations cartographiques et de géovisualisations, d'autre part sur des capacités d'inférence d'un modèle utilisateur qui serait décrit dans sa complexité. Afin de mettre en œuvre cette adaptation, les groupes de travail sur le sujet auxquels je participe s'attache à aborder les différentes approches permettant de décrire le lien entre les représentations cartographiques et les utilisateurs, soit de la carte à l'utilisateur, soit de l'utilisateur à la carte.

L'approche consistant à mieux connaître l'utilisateur et le formaliser en tant que modèle vient d'autres domaines que le nôtre, tels que la psychologie cognitive ou l'ergonomie par exemple. Cette approche est plus utilisée dans la communauté internationale, où psycho-cognition et visualisation de l'information géographique sont liées depuis plus longtemps (Fabrikant et Lobben, 2009; Slocum et al., 2001, Griffin et al., 2012). En visualisation, l'objectif est de proposer des interfaces permettant un haut niveau d'interactivité et des représentations dynamiques de bases de données complexes et multi-variées permettant

à l'utilisateur qui les manipulent d'améliorer ses capacités d'inférence spatio-temporelle et ses prises de décision : en effet, il est attendu de ces interfaces qu'elles facilitent des tâches cognitives comme la reconnaissance de structures, l'imagination, l'association ou le raisonnement analytique ((Thomas et Cook, 2005) in (Fabrikant et Lobben, 2009)). Un des objectifs de ce type de recherches est de s'intéresser tout particulièrement aux différences individuelles et à leur impact sur les représentations cartographiques ou géovisualisations. Néanmoins, nous sommes confrontés à différents problèmes :

- **La question de la perception est en fait majoritairement traitée dans les travaux sur les représentations cartographiques, par rapport à de réelles questions traitées en sciences cognitives** : d'une part, les dimensions de la perception qui nous intéressent pour évaluer les représentations cartographiques sont néanmoins insuffisamment décrites ; d'autre part, mieux connaître la perception d'une variable visuelle ou d'une combinaison de variables visuelles ne suffit pas à maîtriser un modèle utilisateur pertinent. La question de l'impact visuel des représentations cartographiques et des géovisualisations est traitée uniquement sous l'angle de la perception (saillance visuelle, par exemple), mais peu sous l'angle de la cognition (mémorisation, apprentissage, reconnaissance, etc.)
- **La notion d'impact visuel est difficile à traiter (et le terme n'est pas le plus adapté), et souvent abordée uniquement via la perception d'une ou deux variables visuelles plutôt que de l'ensemble de l'image dans sa complexité.**
- **La question de l'évaluation des représentations cartographiques et géovisualisations se pose** : comment mener des tests visuels pour valider l'adéquation d'une variable visuelle, ou l'impression générale d'une carte ? Comment proposer des indicateurs décrivant ce que nous considérons comme faisant la qualité d'une représentation cartographique ?

Les méthodologies employées dans la littérature pour résoudre ces problèmes relèvent en général de l'expérimentation, par des approches qualitatives ou quantitatives, auprès d'utilisateurs ou non, dans des contextes applicatifs variés, de la validité :

- des variables visuelles déjà formalisées par la littérature,
- de nouvelles variables visuelles,
- de nouvelles méthodes de conception ou de nouvelles formes de représentation graphique,
- de nouvelles formes d'interaction avec les données et les représentations.

Les recherches concernant les personnes ayant des déficiences visuelles plus ou moins graves, explorent ces questions de la même façon, en proposant d'ajuster les choix de couleurs dans la production de cartes topographiques (Dhée, 2011), en proposant de nouvelles variables sonores (Josselin et al., 2016), en questionnant de nouvelles formes de représentation et d'interaction avec ces représentations (cartes tactiles par exemple) (Ducasse et al., 2015; Brock et al., 2014, 2015).

La validité des variables visuelles ou des représentations proposées est analysée au regard de la qualité globale de la carte résultante ou d'une de ses propriétés (lisibilité, efficacité, esthétique, satisfaction de l'utilisateur, adaptabilité aux daltoniens, saillance d'un phénomène, etc.). La validité des méthodes de conception et d'interaction sera elle analysée au regard de l'utilisabilité des outils les mettant en œuvre. Même si nous avons à disposition des indicateurs variés et des contraintes cartographiques à respecter, par exemple en ce qui concerne la couleur, il reste difficile de trouver les indicateurs adaptés pour permettre de passer de la qualité d'une palette de couleurs, à la qualité de cette palette appliquée à un jeu de données cartographiques, ou d'optimiser la génération d'une palette ou un ensemble de palettes de couleurs adaptée(s) à un jeu de données cartographiques.

Pistes de recherche envisagées Collectivement au COGIT, nos recherches ont beaucoup visé à fournir des indicateurs de qualité dans un premier temps, puis nous avons visé à aborder le problème de la qualité de la légende et de la carte finale autrement, sous l'angle de la saillance visuelle, de l'impact visuel ou de la caractéristique visuelle.

Nous nous demandons si finalement il est bien utile d'appliquer des mesures globales à l'image-carte, alors que ce qui nous intéresse est finalement assez local : dans une carte, ce sont certains contrastes entre deux régions de l'image, certaines zones de l'image caractérisées par un agencement spatial des objets particulier, certaines couleurs qui segmentent/apaisent/nuancent les contrastes existants (contours noirs) qui sont caractéristiques de l'image. Nous supposons que ce sont ces caractéristiques de l'image, et non l'image toute entière, qui doivent être analysées.

Dans le cadre d'un stage d'initiation à la recherche, co-encadré avec Cécile Duchêne, Dupont et Fontmarty (2012) se sont intéressés à décorrélérer l'impact visuel de deux processus fortement interdépendants,

la généralisation cartographique et la symbologie, sur l'efficacité d'une carte ; dans sa thèse, Jérémie Ory s'intéresse à l'impact visuel de cartes topographiques, et en particulier d'une signature visuelle construite par un agencement particulier de structures spatiales symbolisées, sur la reconnaissance d'un style cartographique. Avec Guillaume Touya, nous nous intéressons à la notion de *complexité visuelle*, à l'instar des travaux d'Arzu Cöltekin sur la question (Schnur et al., 2010; Rautenbach et al., 2015; Brychtová et al., 2016), décomposée selon la définition de (Jégou and Deblonde, 2012) en trois concepts : la *complexité visuelle* est liée à la perception pré-attentive des formes, textures et couleurs, la *complexité sémiologique* est liée à la perception attentive et consciente des signaux graphiques, et la *complexité intellectuelle* est liée à la compréhension des structures spatiales de l'espace géographique. Il s'agirait pour nous de pouvoir identifier, d'une part des zones denses en information, afin d'optimiser la généralisation et la symbolisation, d'autre part des zones moins denses en information, afin de les utiliser comme espace libre pour ajouter de l'information dans la carte (comme des toponymes par exemple)(Touya et al., 2015, 2016).

Pour finir, les propriétés des caractéristiques visuelles identifiées comme saillantes, pourraient être comparées à d'autres zones de l'image, afin d'évaluer si ces propriétés sont conservées ou non, et si les propriétés de certaines zones de l'image s'en rapprochent ou s'en éloignent. Connaître la répartition de cette distance à un ensemble de propriétés pourrait nous permettre éventuellement d'évaluer l'adéquation et la stabilité d'un style (cela reste à tester).

Bilan de l'Action Prospective du GDR MAGIS "Cartographie & Cognition" 2013-2016 (point de vue orienté)

Le sujet visant à questionner les interactions entre représentations (carto)graphiques et cognition était et reste toujours relativement exploratoire dans la communauté francophone. Le montage d'une Action Prospective dans le cadre du GDR MAGIS, avec Marlène Villanova-Oliver (LIG/STEAMER), visait donc dans un premier temps à fédérer un groupe de personnes (chercheurs, ingénieurs, etc.) intéressées par ces questions. Notre démarche visait également à être impliquées étroitement avec la commission de l'International Cartographic Association (ICA) *Cognitive Issues in Geographic Information Visualization*, en suivant leurs actions (implication dans la Commission depuis 2012, actuellement co-chair de la Commission depuis 2015), en faisant remonter des informations du niveau national au niveau international et inversement.

Les deux grandes questions suivantes se sont posées et se posent toujours, en particulier dans les deux événements, que nous avons organisés avec Marlène Villanova-Oliver :

- *Atelier SAGEO 2013 : Représentations cartographiques et Cognition : quelles perspectives de recherche ?* : deux grands thèmes sont ressortis en 2013 : la représentation de dynamiques spatio-temporelles, et, le problème de l'évaluation par les utilisateurs.
- *Assises GDR MAGIS 2015*, avec Didier Josselin, Paule-Annick Davoine et Claire Cunty, nous avons confronté nos expériences et extrait des constats face à ces deux grandes questions.

Dans la suite, nous reprenons donc le résumé de ces discussions collectives, en tentant d'y répondre de façon plus personnelle.

1. **Comment fournir des méthodes de conception cartographiques ou de géovisualisations innovantes qui tirent le meilleur parti des connaissances issues des sciences cognitives et de la psychologie cognitive en particulier ?** L'hypothèse sous-jacente ici est qu'une meilleure connaissance et une meilleure compréhension des processus cognitifs permet de développer de "meilleures" représentations cartographiques et géovisualisations. Ainsi il nous faut identifier les différentes composantes des processus cognitifs mis en jeu (perception, mémorisation, construction du sens, etc.) dans l'usage attendu des représentations cartographiques ou géovisualisations, et proposer des méthodes de conception adaptées.

Constat Dans notre communauté, ce problème est abordé à partir de l'hypothèse que certaines représentations (carto)graphiques existantes ne permettent pas de lire et comprendre un message dans une carte, encore moins d'inférer des connaissances à partir de cette carte. La question se déplace donc vers une réflexion sur l'utilisation des variables visuelles, la proposition de nouvelles représentations ou de nouvelles méthodes de conception. Ce glissement vers le "design" est nécessaire pour résoudre des problèmes de représentation complexe : en particulier, visualiser ensemble des données géographiques (ou non) hétérogènes (vecteur, imagerie, modèles 3D, données du Web, etc.), visualiser des phénomènes spatio-temporels complexes, visualiser des notions complexes comme l'incertitude (des données, des phénomènes, etc.), sont toujours des verrous,

des sujets à la mode et loin d'être fixés.

Une façon de répondre à ce constat a été d'organiser avec Arzu Cöltekin, dans le cadre de la GeoSpatialWeek 2015, le workshop *GeoVIS'15 : Rendering and Cognition with Images and Hybrid Visualizations*) afin de motiver la communauté plutôt "technique" de l'ISPRS, à questionner les travaux de recherche en cours sous l'angle de la perception et de la cognition, en partant de l'idée qu'avec l'avancée technologique que nous avons, nous avons tendance à considérer que nous savons tout des utilisateurs et de leurs pratiques, alors qu'on sait en théorie et en pratique que les individus diffèrent et varient en niveau d'expertise, en connaissance du monde réel, en connaissance de leurs propres buts et des tâches nécessaires pour les atteindre, sans parler des capacités visuo-spatiales variant également chez les individus. L'objectif du workshop était donc de tenter de re-intégrer ces connaissances, de façon pratique, dans les travaux en géovisualisations. Un premier retour intéressant est que, la conférence ayant eu lieu en France, une bonne partie des interventions est venue de chercheurs français impliqué depuis 2013 dans le groupe Cartographie & Cognition du GDR MAGIS, ce qui est plutôt satisfaisant en termes de continuité des discussions et mobilisations autour du sujet. Un deuxième retour intéressant est qu'encore une fois, à part ces personnes déjà impliquées sur ces questions, la question centrale reste le design adapté d'une géovisualisation, donc la méthode de conception ou la méthode de rendu. L'ensemble des publications de ce workshop peut être trouvé dans (Mallet et al., 2015a,b).

- 2. Comment proposer des méthodes d'évaluation adaptées aux spécificités des productions (carto)graphiques et à leurs usages potentiels, en s'appuyant principalement sur des approches de type expérimentations utilisateur ?** L'hypothèse généralement sous-jacente est que certains éléments constitutifs/caractéristiques ou saillants dans les représentations (carto)graphiques activent des processus perceptifs et cognitifs, favorisant un ou plusieurs usage(s) visé(s). La difficulté pour les chercheurs est d'identifier des méthodologies d'évaluation appropriées pour valider cette hypothèse et valider les méthodes de conception en amont. Des approches de type expérimentations utilisateurs sont très utilisées pour atteindre cet objectif.

Constat : difficulté pour gérer conception et évaluation. Soit les chercheurs en géovisualisation gèrent à la fois les deux axes de recherche, soit ils se focalisent sur les méthodes de conception et font réaliser les tâches d'évaluation par les domaines connexes a priori les plus habilités (psychologie expérimentale, sciences cognitives, IHM). Néanmoins deux types de difficultés sont rencontrées. Premièrement, pour les chercheurs qui font les deux tâches successivement, le temps d'investissement est très lourd (montage du protocole et analyse des résultats) et ils font face à la difficulté de spécifier le "bon" protocole, risquant de passer trop vite sur une étape. Deuxièmement, pour les chercheurs qui travaillent avec d'autres chercheurs en psychologie expérimentale et en sciences cognitives, la difficulté rencontrée est celle de préserver une question de recherche liée à la complexité visuelle de l'espace géographique et ne pas le réduire à une représentation de l'espace tellement synthétique qu'elle en perd son sens "géographique" : l'expérimentation devient alors inexploitable dans ses résultats-même. En effet, un effet "pervers" de l'expérimentation est d'adapter les représentations (carto)graphiques conçues pour s'aligner au mieux avec un protocole expérimental fait "à la va-vite" ou défini par une tierce personne. Une recommandation serait d'avoir des indications sur ce qu'il ne faut pas dénaturer de l'espace géographique représenté afin qu'il ne soit pas trop simplifié : dans les domaines experts en évaluation, seul des expérimentations sur des propriétés de très bas niveau peuvent être contrôlées. Il serait pertinent, dans notre communauté, d'assumer le point de vue "tâche complexe" de la cartographie et de trouver le bon niveau de contrôle pour les expérimentations, plutôt que de choisir de trop simplifier structures et relations spatiales.

Constat : difficulté pour interpréter et re-utiliser les résultats d'une expérimentation. Les chercheurs font face à des difficultés pour interpréter les résultats d'une expérimentation utilisateur, voire pour la rendre reproductible ou générique (autre jeu de données, autre variable isolée, autre contexte géographique, autre public visé, etc.) ou en tous cas en mutualiser le résultat. Une question se pose donc sur le contrôle des variables : est-ce qu'on évalue des variables isolées ou est-ce qu'on évalue des tâches de cartographie complexes ? Nous sommes en effet souvent, trop "haut niveau" par rapport aux pré-requis des expérimentations utilisateur imposés par la psychologie expérimentale, et inversement la psychologie expérimentale ou les IHM évaluent à un trop

bas niveau, rendant inexploitable leurs résultats pour des tâches complexes en géovisualisation. Néanmoins, nous pouvons progresser du bas niveau (au sens, variables isolées dans un espace géographique représenté) vers le haut niveau (réalisation de tâches complexes sur l'espace géographique représenté) : en effet, évaluer des variables isolées (en particulier, les variables visuelles de Bertin) est déjà un résultat en soi et permet d'avancer petit à petit vers des tâches plus complexes. Ce serait également une façon de formaliser des connaissances, du signe graphique à la représentation finale globale. Une autre approche consiste à approcher le problème à plus haut niveau, dans ce qu'on peut contrôler de la représentation globale finale. Nous avons ainsi reformulé collectivement la nécessité d'assumer le côté complexe de notre problème, d'apprendre des domaines connexes, sans pour autant être trop contraints par leurs protocoles expérimentaux.

Dans le cadre du projet ANR MapMuxing, ces questions seront traitées justement entre chercheurs en sciences de l'information géographique et en IHM, afin de tenter de déterminer les représentations (carto)graphiques et variables/propriétés visuelles à expérimenter, dans un cadre contrôlé.

Au sujet de ce groupe de travail, il est intéressant de noter la difficulté à fédérer une communauté de recherche, en France, sur ces questions. Même si nos collègues en sciences de l'information géographique soutiennent nos recherches et jugent pertinent de poursuivre sur ces recherches, il reste néanmoins difficile de faire venir des chercheurs sur ce terrain. La difficulté majeure est souvent exprimée de la façon suivante : " je vois bien que le sujet est important pour mes propres recherches et j'aimerais en savoir plus, mais je ne me sens pas capable d'exprimer les liens entre mes recherches et la question de la cognition.". Pour preuve, nous avons soumis un atelier pour la conférence SAGEO2016, avec pour sujet "Mémorisation, raisonnement et prise de décision en géo-visualisation", pour lequel nous n'avons reçu que deux soumissions (de personnes déjà impliquées), que nous avons décidé d'annuler.

Au niveau international, la Commission Cognitive Visualization de l'International Cartographic Association (ICA) vise à développer une théorie et une pratique cartographiques centrées sur l'utilisateur, à partir de connaissances empiriques sur l'utilisation des représentations cartographiques pour l'inférence spatio-temporelle et la prise de décision. Les pratiques d'expérimentations utilisateur sont beaucoup plus anciennes et beaucoup plus intégrées aux sujets de recherche-mêmes (par exemple, dans une thèse de doctorat en information géographique, il est courant d'avoir la moitié d'une thèse dédiée au montage, à la réalisation et à l'analyse des résultats d'une expérimentation utilisateurs). De nombreux workshops ont eu lieu, en particulier sur l'utilisation et des bonnes pratiques d'utilisation d'un eye-tracker dans ce contexte. Avec Amy Griffin, nous allons justement tenter d'explorer cette question de la reproductibilité des expérimentations déjà publiées, sur des nouveaux cas de problèmes.

Pour conclure, ce qui est intéressant, c'est que nous revenons finalement à la question initiale : qu'est-ce qu'on veut évaluer exactement ? Quelles sont les hypothèses à tester ? D'autre part, les expérimentations utilisateur, sont non seulement "à la mode", mais sont également exigées par les différentes communautés, comme validation de n'importe quelle proposition de méthode de conception. Il serait intéressant de confronter ces résultats à des analyses multi-critères, ou à la proposition d'un modèle utilisateur du suivi des traces d'interaction, par exemple, afin d'avoir une meilleure évaluation du problème posé.

Géovisualisation dynamique

Suite aux questions et constats soulignés dans la partie précédente, cela implique pour nous de poursuivre sur les pistes de recherche suivantes afin de proposer des systèmes de géovisualisation dynamique, c'est-à-dire dont les niveaux d'interaction et d'interactivité sont importants, entre un utilisateur et un système, et entre un système et un utilisateur, afin que le système global soit flexible :

1. la possibilité pour les systèmes de géovisualisation de proposer des méthodes variées et flexibles de conception de cartes et de géovisualisation : mes travaux de recherche se sont beaucoup concentrés sur cet aspect afin de proposer des ensembles de paramètres qu'on peut explorer de différentes façons pour concevoir des représentations variées. Il est nécessaire de poursuivre afin de proposer des interfaces (au sens large) entre un utilisateur, quel que soit son niveau d'expertise, et le système, pour exprimer son besoin et accéder au bon niveau de paramétrage.
2. les capacités d'inférence d'un modèle utilisateur complexe : maintenant qu'un certain nombre de connaissances ont été formalisées sur l'utilisateur, ses dimensions perceptives et cognitives (même

si elles restent encore à creuser), il serait intéressant de poursuivre sur des modèles d'interaction. En effet, il est nécessaire maintenant de caractériser les tâches de cartographie, et les tâches d'interaction, de les confronter à la description et à la caractérisation des usages (alignement des tâches élémentaires à des usages haut niveau). En parallèle, afin d'apprendre sur les interactions des utilisateurs, il faut poursuivre sur l'analyse des traces d'interaction pour mieux comprendre la variété des comportements des utilisateurs (essai-erreur, exploration large suivie d'une exploration plus fine, etc.) : de premiers résultats étaient sortis de ma thèse à ce sujet, en particulier de ne pas chercher à répondre à des profils-types, liés uniquement à l'expertise cartographique. Les pratiques sont variées qu'on soit du grand public ou experts : en particulier, certains veulent un résultat rapide avec peu de contraintes exprimées, d'autres vont chercher à construire une solution, en testant beaucoup, en cherchant à approcher une solution, voire à recommencer. Connaître ces comportements permettrait de pouvoir proposer des moyens de négocier avec l'utilisateur plus finement, comme de faire des propositions ad-hoc (lorsqu'il "se perd" dans une tâche, lorsqu'il veut une proposition rapide même si pas optimale, etc.).

3. un modèle pour un système complexe basé sur des interactions entre 1 et 2 : en maîtrisant les connaissances et méthodes associées aux deux modèles précédents du système et de l'utilisateur, nous pourrions proposer un système de géovisualisation dynamique (dans le sens d'une interaction à double sens), parce que prenant en compte les avancées progressives de l'utilisateur, dans ses propositions de pilotage de la conception personnalisée.

Exploitation et expérimentation du modèle de style pour différents usages.

Malgré un état de l'art conséquent sur les usages de la 2D et de la 3D dans certains contextes et pour certaines tâches, une caractérisation des usages des représentations graphiques de l'information géographique reste nécessaire. Notre approche a été jusque là de décrire les processus en jeu dans la représentation graphique, afin qu'ils puissent être plus facilement et plus efficacement contrôlés par d'autres processus et par des utilisateurs variés. En particulier, pouvoir rendre efficacement le territoire ou un phénomène sur ce territoire permettraient à d'autres chercheurs d'avoir un support complémentaire aux méthodes analytiques pour explorer leurs données, ainsi qu'au grand public pour mieux comprendre et appréhender des phénomènes complexes sur le territoire.

Analyse géo-visuelle de dynamiques géo-historiques

Un sujet important est la visualisation de données historiques, qu'elles soient images, vectorisées, ou des données sources externes (type bottin, gravure, etc.), et en particulier la co-visualisation de ces données afin de pouvoir être analysées par les historiens, les démographes, les géographes, etc.

En particulier l'analyse visuelle de la co-évolution de dynamiques pose des problèmes intéressants dans notre domaine. Cela implique de concevoir des outils pour visualiser tout type de données géoréférencées, de co-visualiser ces données avec des sources, ou un phénomène social, démographique ou historique sur le territoire représenté. La co-visualisation implique que les utilisateurs soient capables d'interagir avec tout type de visualisation produite, c'est-à-dire pouvoir sélectionner les données à intégrer dans le processus, la façon dont elles vont être représentées, afin de mettre en valeur des patterns (identification et évolution de réseaux, distribution, structure et évolution des activités humaines ou économiques, grandes tendances socio-démo-historiques) et de permettre d'inférer de nouvelles connaissances sociales et spatio-temporelles. Des questions de sélection et de représentation de données se posent (comment représenter des bâtiments et différentes étapes associées de construction, modification ou destruction sur une large période de temps?), ainsi que d'interaction (comment manipuler les interfaces pour pouvoir afficher des données variées et hétérogènes, représentant le même territoire, mais à des échelles spatiales et temporelles différentes?). Un problème intéressant est aussi la représentation de l'incertitude dans un tel contexte : les données et les métadonnées associées peuvent être imprécises ou imparfaites, alors même que les phénomènes sociaux ou historiques sont également incertains.

Résoudre ces problèmes nécessitent d'utiliser les connaissances formalisées et les méthodes d'optimisation testées dans le travail de stage de Cécile Remy sur l'expérimentation d'une sémiologie graphique complexe pour la visualisation des constructions, modifications, destructions de bâtiments sur une grande

période de temps. La proposition d'une sémiologie graphique complexe permettant de gérer incertitude, complexité visuelle et choix de représentation est un axe à développer, ainsi que la co-visualisation de données géographiques hétérogènes, comme des techniques de multiplexing.

L'objectif est alors de produire des cartes ou représentations graphiques de tout type de co-visualisation, de données/sources, de données hétérogènes à différentes échelles spatiales et temporelles, et finalement de tout phénomène socio-historique, et de les faire expérimenter par les chercheurs en histoire ou en démographie historique, afin d'évaluer la capacité d'analyse géo-visuelle des représentations (carto)graphiques proposées.

Diffusion grand public de phénomènes physiques complexes et incertains

Un dernier cas d'usage intéressant, qui reprend des enjeux et problématiques (techniques et thématiques) décrits dans les deux cas précédents, est celui de l'adaptation des géovisualisations de phénomènes physiques complexes et incertains, pour la communication grand public. En particulier, cela concerne les phénomènes météorologiques, à la fois les résultats des modèles de simulation et de prédiction, et la gestion d'événements météorologiques accidentels (cas des tsunamis dans les Caraïbes dans le cadre du projet MapMuxing). En effet, nous faisons face à de grandes quantités de données complexes issues de modèles de simulation, associées à des informations thématiques, et agrégées à des échelles diverses et variées. D'une part, les données sont particulièrement complexes à comprendre car multi-dimensionnelles, prédictives et incertaines, d'autre part ces échelles d'agrégations ne sont pas toujours celles correspondant aux besoins du grand public (quel temps va-t'il faire chez moi demain?). Il est nécessaire de repenser la façon de présenter ces informations au public, sans simplifier à outrance les données et les phénomènes, mais en mettant en avant différents aspects des phénomènes étudiés : en particulier, la dangerosité d'un événement semble poser problème aux experts car elle est très difficile à appréhender par le grand public, et il est difficile de s'assurer que le grand public va adopter alors un comportement adapté.

La question d'explorer de la co-visualisation de données brutes, simulées, dérivées et thématiques pour une meilleure visualisation de ces phénomènes se pose : à quel moment faut-il généraliser et jusqu'où. De plus, le côté multidimensionnel de l'information nécessite d'explorer nos ensembles de variables visuelles, et donc de proposer éventuellement de nouvelles sémiologies graphiques plus complexes, associées à des techniques issues de la visualisation d'information, voire de la visualisation scientifique, afin de mettre en évidence des patterns ou de pouvoir visualiser et interagir avec quelques dimensions privilégiées du problème. Ce problème de la géovisualisation de phénomènes physiques pose enfin la question de l'incertitude des données et des modèles, tout au long de la chaîne de traitement, ainsi que la propagation de ces incertitudes jusqu'à la visualisation finale. Encore une fois, des questions de sémiologie graphique et de rendu se posent, comme de qualité de l'information construite, perçue et comprise. Pour finir, des questions de rendu en temps réel se posent pour traiter de grandes quantités de données, sur des supports à définir, et dont il faut maîtriser la qualité, ou choisir des méthodes pour servir un rendu continu.

Concertation citoyenne autour de l'aménagement de l'espace urbain

Au-delà de l'innovation technologique à laquelle nous participons, nous supposons, ou nous visons une innovation sociale ; en tous cas, nous observons une modification des pratiques liées à la cognition spatiale et à la cartographie. La question est de savoir si les utilisateurs des outils et des cartes, et les usagers, s'approprient efficacement ces objets pour résoudre des problèmes liés à l'espace géographique qui les concerne, qu'ils habitent, qu'ils utilisent, dont ils participent au développement. Pouvoir naviguer dans différents styles de rendu permet également d'avoir différentes perspectives possibles sur un même espace géographique, et ainsi de pouvoir en comprendre certaines dimensions complexes.

En particulier dans le cas de l'aménagement urbain, différents problèmes de compréhension se posent pour le grand public concernant la réglementation urbaine. Non seulement les documents de réglementation sont particulièrement complexes à lire, mais les concepts manipulés et la nécessaire projection mentale du résultat à venir restent extrêmement complexes. Les capacités de cognition spatiale, et les problèmes de représentation mentale de l'espace, ne sont pas partagées également par tous. Les travaux initiés dans le projet PEPS Plu++ avec Mickaël Brasebin et Florence Jacquinod montrent bien la difficulté de spécifier le besoin, malgré une bonne connaissance des usages de la 3D, et la diversité des possibles nécessite d'être contrainte également par cette connaissance des usages. Les citoyens ont besoin de comprendre ce que la réglementation urbaine permet de construire et où, selon quelles contraintes : il s'agit donc de faire percevoir des volumes et formes à bâtir, afin de faire comprendre la morphologie des

bâtiments, ainsi que leur relation avec leur environnement, et la répartition des espaces vides et pleins en ville. La stylisation 3D apporte un outil intéressant pour naviguer entre les styles pour trouver le bon niveau de réalisme/abstraction attendu, qui donnerait la "bonne donnée" à voir et le "bon problème" à considérer, plutôt que fournir des représentations de l'espace extrêmement détaillées ou très schématisées.

Cette problématique est étendue dans le cadre du projet ANR MapMuxing, où nous visons de valider l'adéquation des murs d'écrans pour la concertation citoyenne autour des problématiques de gestion de crise : encore une fois, problématiques d'interaction entre acteurs et interactions avec un support de géovisualisation sont en question. Comme elle se posera avec les dispositifs de réalité virtuelle et augmentée, visant potentiellement à améliorer la compréhensibilité de problèmes spatio-temporels complexes pour le grand public.

Le travail de thèse démarré par Cécile Remy (Remy and Christophe, 2015) a permis de positionner également le problème des usages de l'information géographique collaborative dans le cadre de l'aménagement des réseaux d'eau potable et d'assainissement dans les pays du sud : de premières modélisations des usages des réseaux confrontés aux usages de l'information géographique collaborative montre la nécessité de caractériser formellement ces usages et les boucles d'interactions entre les différents acteurs du système. L'idée de la thèse était de proposer une modélisation de ces systèmes et du système d'interaction supposé, à partir de données acquises sur le terrain (entretiens guidés avec différents acteurs de ces systèmes), afin de mettre en évidence les relations existantes, et questionner les boucles de rétroactions éventuellement positives, amenant à questionner nos propres méthodes d'acquisition et de représentation de l'IG. Cela reste à poursuivre.

Annexe A

CV détaillé

Née le 29/01/1978

En poste de CR2 Développement Durable depuis le 15/09/2010, promue CR1 depuis le 01/01/2015, équipe COGIT, LaSTIG, IGN.

Thèmes de recherche : sciences de l'information géographique, cartographie, géovisualisation, sémiologie graphique.

2010	Qualification MCF en CNU 23 (04/02/2010)
2009	Docteur en Sciences de l'Information Géographique de l'Université Paris Est, École doctorale Mathématiques et Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication (MSTIC)
2001	Ingénieur Agronome spécialité Traitement de l'Information Spatiale (École Nationale Supérieure d'Agronomie de Rennes, AgroCampus Rennes).

Activités professionnelles

Depuis 2015	Co-responsable Cycle de Conférences M2IGAST, ENSG – Univ. Paris-Est.
Depuis Jan. 2015	Chargée de Recherche 1^è classe , Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer (MEEM), Équipe COGIT, LaSTIG, IGN.
Depuis 2014	Équipe pédagogique Licence Professionnelle Géomatique et Environnement, Responsable de module « Modélisation et SIG », Univ. Paris 1 – Panthéon Sorbonne – ENSG. Responsable de module « Webmapping », M2 Information Géographique, ENSG – Univ. Paris-Est.
Depuis Sept. 2010	Chargée de Recherche 2^è classe , Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, et de l'Énergie (MEDDE), Équipe COGIT, IGN. Chargée de cours , LP, M2, Ingénieurs, ENSG - Uni. Paris-Est.
Jan. – Sept. 2010	Post-Doctorante , projet TRACES, membre de l'équipe STEAMER, Laboratoire d'Informatique de Grenoble, Univ. Joseph Fourier. <i>Enquêtes déplacements assistées par GPS, acquisition, traitement et visualisation de traces GPS.</i> Chargée de cours Licence Professionnelle Études Statistiques et Systèmes d'Information Géographique (ESSIG). IUT2 Grenoble, Univ. Pierre Mendès France (UPMF).
Oct. 2006 – Oct. 2009	Doctorante , membre de l'axe de recherche sur « l'aide à l'accès à l'information géographique ». Équipe COGIT, IGN. <i>Modélisation de connaissances, modèle de dialogue homme-machine, satisfaction de contraintes, sémiologie graphique.</i> Chargée de cours , LP, M2, Ingénieurs, ENSG - Univ. Paris-Est.
Nov. 2005 - Oct. 2006	Ingénieur d'études (IE) SIG , Programme Interdisciplinaire de recherche sur l'environnement de la Seine (PIREN Seine). CNRS UMR 7619 Sisyphe, Univ. Pierre et Marie Curie Paris 6. <i>Administration des bases de données sur la Seine. Développement de l'Atlas des pressions anthropiques sur le bassin de la Seine (AIPresHume). Travaux cartographiques. Formations en SIG.</i>
Fév. 2003 - Nov. 2005	Ingénieur Études et Développement SIG . Générale d'Infographie, Le Pecq. <i>Conception et développement d'applications SIG en environnement, agriculture et transport. Modélisation des données. Études cartographiques. Formation des utilisateurs.</i>
Nov. 2002	Expert cartographie . Digitech-International - UNOSAT, Bagneux. <i>« Évolution de la végétation en Afghanistan de 1978 à 2002 » à partir d'images Landsat.</i>
Jan. 2002 - Août 2002	Formatrice professionnelle en informatique, Blits Consulting Group, Paris.
2002	Rédactrice de contenus pédagogiques, Paraschool, Paris.

Stages

Avr. 2001 - Sept. 2001	Stagiaire , stage de recherche 6 mois, Équipe COGIT, IGN. <i>« Analyse des structures urbaines - Implémentation d'un outil de détection et de caractérisation des alignements de bâti »</i> (Christophe, 2001; Christophe and Ruas, 2002)
Juil. 2000 - Sept. 2000	Stagiaire , European Soil Bureau, Space Applications Institute, Joint Research Center (JRC), Ispra, Italie.

Encadrements

Encadrement doctorants terminé

Jérémy Ory *Connaissances pour la construction et la perception de styles cartographiques : Territoires et pratiques cartographiques.* École Doctorale MSTIC, spécialité Sciences de l'Information Géographique, Université Paris-Est.

Direction : S. Fabrikant (Univ. de Zürich) et B. Bucher (IGN/COGIT, Univ. Paris-Est) depuis le 1er Octobre 2012. Thèse soutenue le 2 Décembre 2016.

Charlotte Hoarau *Représentations cartographiques intermédiaires : comment co-visualiser une carte et une ortho-photographie pour naviguer entre abstraction et réalisme ?* École Doctorale MSTIC, spécialité Sciences de l'Information Géographique, Université Paris-Est.

Direction : S. Mustière (IGN/COGIT, Univ. Paris-Est) depuis le 19 Octobre 2011. Thèse soutenue le 2 Juillet 2015.

Cécile Remy *Quels usages effectifs de l'information géographique volontaire pour la production et la gestion des services urbains ? Application au secteur de l'eau et de l'assainissement dans les quartiers défavorisés des villes des Suds.* École Doctorale VTT, spécialité Géographie, Allocation doctorale fléchée sur le pôle thématique « Ville, Environnement et leurs Ingénieries », Université Paris-Est.

Direction : S. Jaglin (ENPC, LATTS, Univ. Paris-Est) du 3 Novembre 2014 à Mars 2016.

Thèse interrompue par la candidate.

Encadrement post-doctorants terminé

Bertrand Duménieu Dr. en Mathématiques et applications aux sciences de l'homme (EHESS) : *Modélisation, implémentation, évaluation et extrapolation de styles cartographiques.* Projet ANR MapStyle, du 3 Novembre 2014 au 30 Septembre 2016.

Antoine Masse Dr. en Traitement d'image appliqué à la télédétection (Univ. Paul Sabatier de Toulouse) : *Géo-visualisation de la zone côtière.* Projet ANR MapStyle, du 3 Novembre 2014 au 30 Septembre 2016.

Participation à des jurys de thèse

- Thèse Hugo Loi, PhD Informatique, Université de Grenoble, France : *Programmable Synthesis of Element Textures and Application to Cartography.* Invitée. 16 Décembre 2015.
- Thèse Victoria Rautenbach, PhD Geoinformatics, University of Pretoria, South Africa : *The use of 3D geovisualisation for urban design : The case of informal settlement upgrading in South Africa.* Examinatrice. Soutenance prévue en 2017.

Prix

- The **Henry Johns Award 2016** from The Cartographic Journal and the Council of the British Cartographic Society, for the paper Ory J., Christophe S., Fabrikant, S., Bucher B., 2015, "How Do Map Readers Recognize a Topographic Mapping Style?", *The Cartographic Journal*, Volume 52 No.2, pp.193-203¹
- Prix du **meilleur poster SAGEO 2016** : Brasebin, M., **Christophe, S.**, Jacquinod, F., **Vinasse, A.**, and Mahon, H. (2016). Projet plu++ : vers un plan local d'urbanisme plus intelligible et plus participatif. In *Actes du Colloque International de Géomatique et d'Analyse Spatiale (SAGEO 2016)*.
- Lauréate du **Prix de thèse 2010** du GDR Magis²
- Finaliste du Prix de thèse 2010 de la revue Mappedmonde³

1. <http://www.cartography.org.uk/awards/past-winners/>

2. http://gdr-magis.imag.fr/index.php?option=com_content&view=article&id=146&catid=42

3. http://mappemonde-archive.mgm.fr/num27/mois/intro_these.html

Stages encadrés

2016	Anouk Vinesse	<i>Conception et implémentation d'un modèle de style adapté à une application web 3D.</i> M2 UrbanSTIC, Centrale Nantes. Co-encadrement avec M. Brasebin, 6 mois.
	Blandine Decherf	<i>Exploitation des méthodes de rendu expressif pour la cartographie (Style Cassini).</i> M2 Carthagéo, ENSG. Co-encadrement avec B. Duméniou, 2 mois.
2014	Florian Pelloie	<i>Vers une sémiologie graphique 3D appliquée à l'urbanisme.</i> M1 Géographie, Paris 1. Co-encadrement avec E. Buard et M. Brasebin (COGIT), 4 mois.
	Cécile Remy	<i>Sémiologie graphique pour la représentation des dynamiques urbaines Identification et modélisation de connaissances pour la conception de cartes diachroniques efficaces en superposition. Application à l'évolution du bâti en milieu urbain.</i> M2 IG, Université Paris-Est et ENSG. Co-encadrement avec J. Perret (COGIT), 6 mois.
	Laurane Boulanger	<i>Vers un "style Cassini" : méthodologie pour automatiser le rendu Cassini.</i> M2 Carthagéo, Univ. Paris1, ENSG. 2 mois.
2013	Thomas Escrinhuela	<i>Méthodes de Résolution pour la Visualisation des Toponymes.</i> M2 Carthagéo, Univ. Paris1, ENSG. Co-encadrement avec C. Hoarau (COGIT), 2 mois.
2012	Patrick Kaboré	<i>Développement de l'activité webmapping sur l'aménagement numérique du territoire.</i> M2 IG, ENSG. Enseignant référent, 6 mois.
2011	Anahid Kasbarian,	<i>Concevoir des cartes stylisées : exemple du Pop-Art.</i> Ingénieurs ITGCE (2è année) "Initiation à la recherche" (12 journées/binôme). Co-encadrement avec C. Hoarau (COGIT).
	Antoine Audusseau	
	Mathilde Dupont,	
	Thibaut Fontmarty	
2009	Hugo Roussaffa	<i>Caractérisation de l'harmonie dans une carte.</i> M1 Carthagéo, Université Paris-7. 6 mois
2007	Guillaume Ménégaux	<i>Consultation et classification d'une base d'échantillons cartographiques.</i> M2 SIG, ENSG. 6 mois.

Animation scientifique

- Montage de l'axe structurant GeoVIS entre les équipes COGIT et MATIS participant au projet scientifique d'une future UMR IGN – UPEM – UP7 – CBRS - IPGP (à partir de 2015).
- Montage et animation du projet ANR MapStyle (IGN, IRIT, INRIA) (2012-2016).
- Participation au montage du projet PLU++ Vers un Plan Local d'Urbanisme plus intelligible et plus participatif (Mar. 2015 – Mar. 2016) (AAP PEPS Université Paris-Est 2015). Coordination : M. Brasebin (IGN/COGIT) ; Collaboration : F. Jacquinod (EIVP).
- Participation au montage du projet ANR MapMuxing (2014-2017). Coordination : G. Touya (IGN/COGIT) ; Collaboration : INRIA, Univ. Montpellier 3.

Montage de projets refusés

- Soumission de projets H2020 Innovative Training Networks (ITN) en collaboration avec les Universités de Brême (C. Freska), Aalto (T. Jaupinnen), Athènes (M. Kavouras) et Zürich (S. Fabrikant), entre autres, avec proposition de deux sujets de thèse co-encadrés avec S. Fabrikant :
 - GeoiXplore : Understanding the geospatial environment : a human-centred interactive approach to exploration, communication and visualization. (projet soumis en Juin 2014, rejeté en Nov 2014)
 - weTHINKgeospatial : Human-centred spatial knowledge processing (projet soumis en Janvier 2015, rejeté en Mai 2015)
- Montage de projets de R&D FUI (2014-2015) : OpenCityLayers ("Réalité urbaine augmentée et collaborative ") et VISO (" Plateforme pour l'aide à la décision pour le design de villes vivables et sobres ") avec M. Brédif (IGN/MATIS), avec la Direction de la Stratégie, de l'International et

de la Valorisation et la Direction des Services et des Systèmes d'Information à l'IGN : ces projets n'ont pas finalement pas été acceptés.

- Montage du projet PEPS UPE Smart Cities "Smart cities : dimensions techniques et sociale de la coordination autour de bases de données urbaines", LATTS, LEESU, COGIT (AAP PEPS UPE 2016).
- Montage du projet PEPS UPE-CNRS ACORD ("Annotation automatique d'un corpus visuel documentant un transect urbain") avec O. Bonin (IFSTTAR) (AAP PEPS 2015).

Associations scientifiques et techniques

ICA : International Cartographic Association

- Co-Chair de la commission ICA Cognitive Visualization (2016 - 2020) (Chair : Amy Griffin, University of New South Wales, Australie)⁴.
- Représentante française de la commission ICA Cognitive Visualization (2011 - 2015)
- Représentante française de la commission ICA Art & Cartography (2006 - 2010)

ISPRS : International Society for Photogrammetry and Remote Sensing

- Co-Chair du working group ISPRS Commission IV, Geovisualization, Augmented and Virtual Reality (WG IV/9) (2016-2020) (Chair : Arzu Cöltekin, Université de Zürich, Suisse)⁵.
- Membre du working group ISPRS Commission II (WG II/6) : Geovisualization and Virtual Reality (depuis 2015).

GDR MAGIS : Méthodes et Applications pour la Géomatique et l'Information Spatiale

- Reconstitution de l'Action Prospective (2017 - 2020) sous le nom *Géo-visualisation(s) & Cognition*, avec Marlène Villanova-Oliver (LIG/STEAMER)
- Chair de l'action prospective *Cartographie & Cognition : Liens entre représentations cartographiques et mécanismes cognitifs*, avec Marlène Villanova-Oliver (LIG/STEAMER) (2013 - 2016)⁶.
- Membre du bureau du GDR MAGIS depuis 2013.
- Membre du GDR MAGIS depuis 2006.

Comité Français de Cartographie (CFC) : Commission Sémiologie⁷

- Membre de la commission.

Organisation de conférences, congrès, workshops et école d'été

- Workshop ICC'2017 "Maps and Emotions" - Washington DC - July 1-2, 2017 (*co-chair, avec la Commission Art & Cartography*).
- Atelier SAGEO 2016 "Mémorisation, raisonnement et prise de décision en géo-visualisation : comment aborder les dimensions cognitives en jeu ?" - Nice, France - Mardi 6 Décembre 2016 (*co-chair, avec Marlène Villanova-Oliver, LIG/STEAMER*). (*annulé par manque de soumission*).
- GeoSpatialWeek 2015, Workshop GeoVis "Rendering and Cognition with Images and Hybrid Visualizations" - La Grande Motte, France - 1er Octobre 2015 (*chair*).
- Atelier SAGEO 2013 "Représentations cartographiques et Cognition : quelles perspectives de recherche ?" - 23 Septembre 2015 - Brest, France (*co-chair, avec Marlène Villanova-Oliver, LIG/STEAMER*).
- 3^e Ecole d'été en Géomatique du GDR-MAGIS - 15-19 Octobre 2012 - Aussois, France (*Comité d'organisation*).
- International Cartographic Conference (ICC) - 2-8 Juillet 2011 - Paris, France (*Comité d'organisation : responsable événement Speed Presenting Young Researchers*).

4. <http://cogvis.icaci.org/>

5. <http://www.casa.ucl.ac.uk/geoviz/>

6. <https://sites.google.com/site/cartocognition/>

7. <http://www.lecfc.fr/index.php?page=commission&commission=15>

Comité de programme

- ICC 2017 "Maps & Emotions" workshop - Washington DC, USA - July 1-2, 2017.
- GIScience 2016 Workshop on Understanding Spatial Data with Visual Analytics - 27 Septembre 2016 - Montréal, Canada.
- Colloque Temps, Art & Cartographie : la sémiologie dans tous les sens - 16-18 Mars 2016 - Université de Strasbourg.
- GeoSpatialWeek 2015, Workshop GeoVis, "Rendering and Cognition with Images and Hybrid Visualizations" - La Grande Motte, France - 1er Octobre 2015 (*chair*).
- GeoSpatialWeek 2015, Conférence ISSDQ - La Grande Motte - 29-30 Septembre 2015.
- Spatial Analysis and GEomatics (SAGEO) 2012, 2013, 2014, 2015.
- International Cartographic Conference (ICC) 2011, 2013, 2015, 2017.
- Workshop ICA CogVis Commission 2015, 2017.

Relectures

- Conférences internationales : FOSS4G 2009 Academic Track, ICC 2011, 2013, 2015, 2017, ISSDQ 2015, GIScience Spatial Visual Analytics 2016
- Conférences nationales : SAGEO 2013, 2014, 2015.
- Revues : International Journal of Cartography, International Journal of Geographical Information Systems (IJGIS), Transaction in GIS (TGIS), Cartographica, Techniques et Sciences Informatiques (TSI), Cartography and Geographic Information Society (CaGIS), Spatial Cognition and Computation : An Interdisciplinary Journal, International Journal of Digital Earth (IJDE), International Journal of GeoInformation (IJGI), Computers & Geosciences.
- Conférence technique : Francophone Open Source Géomatique (FROG) 2013.

Enseignements

Mots-clés : Systèmes d'Information Géographique (SIG), Cartographie, Modélisation et conception des bases de données spatiales, Webmapping, Technologies Web, Métadonnées.

Responsabilités en enseignement :

- Master 2 Information Géographique : Analyse Spatiale et Télédétection (IGAST) - ENSG, Univ. Paris-Est : Responsable des cycles de conférence (depuis la rentrée universitaire 2015-2016) – participation au montage du Master en 2014.
- Licence Professionnelle Géomatique - ENSG, Univ. Paris 1 :
 - Membre de l'équipe pédagogique (depuis 2013).
 - Responsable du module SIG & Bases de données (depuis 2014).
- Master 2 Information Géographique (IG) - ENSG, Univ. Paris-Est : Responsable du module Webmapping (2012 – 2015).

Liste des enseignements (page suivante).

Année	Public	Établissement	Intitulé	CM	TD
2016 - 2017	M2 Information Géographique : Analyse Spatiale et Télédétection (M2IGAST)		Cycle de conférences		3
2015 - 2016	LP Géomatique	ENSG Marne la Vallée	Théorie de SIG	7	21
	M2 Information Géographique : Analyse Spatiale et Télédétection (M2IGAST)		Cycle de conférences		3
2014 - 2015	Formation Continue EVAFI	ENSG Marne la Vallée	Gestion d'un projet informatique	3,5	
	LP Géomatique		Théorie des SIG	3,5	
2013-2014	M2 Information Géographique (IG)	ENSG Marne la Vallée	Webmapping	7	14
	M2 Géomatique Image	AgroCampusOuest	Géomatique	3,5	
	M1 Géographie	Univ. P 1- P 7	Sémiologie graphique	2	
2011-2012	M2 Information Géographique (IG)	ENSG Marne la Vallée	Webmapping	3,5	10,5
	LP Géomatique		QGIS		7
	M2 Systèmes d'Information et Applications Web (SIAW)	Univ. Paris Est	Webmapping		3,5
	M1 Géographie	Univ. P 1- P 7	Sémiologie graphique	3	
2010-2011	L3 Etudes Statistiques et Sciences de l'Information Géographique (ESSIG)	IUT 2 / UPMF Grenoble	Webmapping	7	14
2009-2010	M1 Systèmes d'Information et Informations sur la Gouvernance et la Gestion du Territoires (SIG3T)	Univ. Montpellier III	Sémiologie graphique	3	3
	L3 Etudes Statistiques et Sciences de l'Information Géographique (ESSIG)	IUT 2 / UPMF Grenoble	BD spatiales	4	10
	M2 Développement Durable Management Environnemental et Géomatique (DDMEG)	ENSG Marne la Vallée	SIG		42
2008-2009	M2 Information Géographique (IG)	ENSG Marne la Vallée	SIG	3,5	21
	M1 Systèmes d'Information et Informations sur la Gouvernance et la Gestion du Territoires (SIG3T)	Univ. Montpellier III	Webmapping Modélisation Sémiologie graphique	3,5 10,5 3,5	3,5
2007-2008	M2 Information Géographique (IG)	ENSG Marne la Vallée	SIG	3,5	7
	M2 Géomatique		Webmapping Métadonnées Schémas de données	3,5 3,5 3,5	3,5
	Cycle Ingénieur IT2		SIG		21
2006-2007	M2 Sciences de l'Information Géographique (SIG)	ENSG Marne la Vallée	SIG	3,5	17,5
	Formation Continue		Webmapping PHP	3,5 7	7
TOTAL				96	211,5

Annexe B

Liste des publications

Livres :

- [1] Mallet, C., Paparoditis, N., Dowman, I., Oude Elberink, S., Olteanu-Raimond, A.-M., Rottensteiner, F., Yang, M.-H., **Christophe**, S., Çöltekin, A., and Brédif, M. (2015a). *Proceedings of the ISPRS Geospatial Week 2015*, volume II-3/W5. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, La Grande Motte, France.
- [2] Mallet, C., Paparoditis, N., Dowman, I., Oude Elberink, S., Olteanu-Raimond, A.-M., Sithole, G., Rabatel, G., Rottensteiner, F., Briottet, X., **Christophe**, S., Çöltekin, A., and Patanè, G. (2015b). *Proceedings of the ISPRS Geospatial Week 2015*, volume XL-3/W3. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, La Grande Motte, France.

Revue internationale avec comité de lecture :

- [1] **Christophe**, S. and Hoarau, C. (2012). Expressive map design based on Pop Art : Revisit of Semiology of Graphics? *Cartographic Perspectives*, 73.
- [2] **Christophe**, S. (2011). Creative Colours Specification Based on Knowledge (COLorLEGend system). *Cartographic Journal, The*, 48(2) :138–145.
- [3] **Christophe**, S. (2008b). Legend Design on the Web : creating accurate styles. *International Journal of Spatial Data Infrastructures Research (IJS DIR) Special Issue Vol.3, GI-DAYS 2007, Muenster : Young Researchers Forum. Guest Editors : Florian Probst and Carsten Kessler*.
- [4] Duchêne, C., **Christophe**, S., and Ruas, A. (2011). Generalisation, symbol specification and map evaluation : feedback from research done at COGIT laboratory, IGN France. *International Journal of Digital Earth*, 4(sup1) :25–41.
- [5] Hoarau, C. and **Christophe**, S. (2016). Cartographic continuum rendering based on color and texture interpolation to enhance photo-realism perception. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, in press :- . <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.09.012>
- [6] Masse, A. and **Christophe**, S. (2016a). Améliorer la perception du réalisme dans la géovisualisation du littoral - utilisation de données spatio-temporelles hétérogènes. *Revue Internationale de Géomatique*.
- [7] Ory, J., **Christophe**, S., Fabrikant, S. I., and Bucher, B. (2015). How do map readers recognize a topographic mapping style? *The Cartographic Journal*, 52(2) :193–203.
- [8] Touya, G., **Christophe**, S., and Hoarau, C. (2016). Clutter and map legibility in automated cartography : A research agenda. *Cartographica : The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 51(3).

Revue nationale avec comité de lecture :

- [1] **Christophe**, S., Perret, J., and Hoarau, C. (2013). Extraction de palettes de couleurs pour l'aide à la conception cartographique. *Technique et Science Informatiques, Revue des sciences et technologies de l'information*, 32(3-4) :401–430.
- [2] **Christophe**, S. (2010). Aide à la conception de légendes personnalisées et originales. *Mappemonde*, 99(3).
- [3] Drevon, G., Jambon, F., Chardonnel, S., **Christophe**, S., André-Poyaud, I., Davoine, P.-A., and Lutoff, C. (2015). Évaluation comparée de l'apport de l'assistance gps aux enquêtes de mobilité. *Netcom – Réseaux, communication, Territoire - Représenter des populations et des territoires en mouvement*, 28(1/2) :0987–6014.

Chapitres d'ouvrage :

- [1] Balley, S., Baella, B., **Christophe**, S., Pla, M., Regnauld, N., and Stoter, J. (2014). Map specifications and user requirements. In Burghardt, D., Duchêne, C., and Mackaness, W., editors, *Abstracting Geographic Information in a Data Rich World*, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, pages 17–52. Springer International Publishing.
- [2] **Christophe**, S. (2009b). *Cartography and Art : Making Legends By Means of Painters' Palettes*, chapter 8- Making Legends By Means of Painters' Palettes, pages 81–92. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Springer Berlin Heidelberg.

Communications orales invitées :

- [1] **Christophe**, S. (2014). Current issues of perception and cognition in map design. In Jan Brus, Alena Vondráková, V. V. U. P. K. g., editor, *CartoCon Conference 2014, Olomoucz, Czech Republic*. Palacky University, 2014, CartoCON 2014 : Olomouc, Czech Republic, : Conference Proceedings : [abstract Proceedings.

Conférences internationales :

- [1] Brasebin, M., **Christophe**, S., Jacquinod, F., Vinasse, A., and Mahon, H. (2016). 3d geovisualization & stylization to manage comprehensive and participative local urban plans. In *11th 3D Geoinfo Conference*, ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., IV-2-W1, pages 83–91.
- [2] Brasebin, M., **Christophe**, S., Buard, E., and Pelloie, F. (2015). A knowledge base to classify and mix 3d rendering styles. *Brazilian Society of Cartography, Geodesy, Photogrammetry and Remote Sensing*, 5(67) :1067–1077. Special Issue 27th ICC.
- [3] **Christophe**, S., Duménieu, B., Turbet, J., Hoarau, C., Mellado, N., Ory, J., Loi, H., Masse, A., Arbelot, B., Vergne, R., Brédif, M., Hurtut, T., Thollot, J., and Vanderhaeghe, D. (2016). Map Style Formalization : Rendering Techniques Extension for Cartography. In Bénard, P. and Winnemöller, H., editors, *Non-Photorealistic Animation and Rendering*. The Eurographics Association.
- [4] **Christophe**, S., Hoarau, C., Boulangier, L., Turbet, J., and Vanderhaeghe, D. (2015). Automatic rendering of a Cassini style. In *27th International Cartographic Conference (ICC'15)*, Aug. 23-28, Rio de Janeiro, Brasil. (abstract)
- [5] **Christophe**, S. (2012). Cartographic Styles between traditional and original (towards a cartographic style model). In *AutoCarto2012, 16-18 September, Columbus, Ohio, USA*.
- [6] **Christophe**, S., Hoarau, C., Kasbarian, A., and Audusseau, A. (2012). A framework to make Pop Art map design. In *GIScience2012, Sept. 19-21, Columbus, Ohio, USA*.
- [7] **Christophe**, S., Zanin, C., and Roussaffa, H. (2011). Colours Harmony in Cartography. In *25th International Cartographic Conference (ICC2011)*, 2011 July, 2-8, Paris, France.
- [8] **Christophe**, S. and Ruas, A. (2009). A process to design creative legend on-demand. In *24th ICA Conference - 14-19 Novembre 2009, Santiago du Chili, Chili*.
- [9] **Christophe**, S. (2008c). Making legends by means of painters' palettes. In *Art and Cartography Symposium, 31 Janvier au 2 Février 2008, Vienne, Autriche*.
- [10] **Christophe**, S. (2008b). Creative cartography based on dialog. In *AutoCarto 2008, Sept. 8-10, Shepherdstown, WV, USA*.
- [11] **Christophe**, S. (2007a). A Web dialogue for creative portrayal. In *23rd International Cartographic Conference (ICC'07)*, 4-10 Août 2007, Moscou, Russie.
- [12] **Christophe**, S. (2007b). Legend design by a novice user on the web. In *5th Geographic Information Days (GIDAYS'07)*, 10-12 Septembre 2007, Münster, Allemagne.
- [13] **Christophe**, S. and Ruas, A. (2002). Detecting Building Structures for generalisation purposes. *Spatial Data Handling 02, Ottawa, Canada*.
- [14] Fabrikant, S. I., **Christophe**, S., Papastefanou, G., and Maggi, S. (2013). How to measure and visualize emotion when using maps. In *26th International Cartographic Conference (ICC'13)*, Dresden, Germany. (abstract).
- [15] Fabrikant, S. I., **Christophe**, S., Papastefanou, G., and Maggi, S. (2012). Emotional response to map design aesthetics. In *GISciences2012, Sept. 19-21, Columbus, Ohio, USA*.
- [16] Hoarau, C. and **Christophe**, S. (2015). Color and texture interpolation between orthoimagery and vector data. In *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and the Spatial Information Sciences*, volume II-3/W5.
- [17] Hoarau, C., **Christophe**, S., and Mustière, S. (2015). Sliding from imagery realism to topographic abstraction. In *27th International Cartographic Conference (ICC'15)*, Aug. 23-28, Rio de Janeiro, Brasil. (abstract)
- [18] Hoarau, C., **Christophe**, S., and Mustière, S. (2013). Mixing, blending, merging or scrambling topographic maps and orthoimagery in geovisualizations? In *26th International Cartographic Conference (ICC'13)*, 25-30 August, Dresden (Germany).
- [19] Masse, A. and **Christophe**, S. (2015a). Geovisualization of coastal areas from heterogeneous spatio-temporal data. In *ISPRS Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, volume Vol. XL-3/W3.

Conférences nationales :

- [1] **Christophe, S.**, Davoine, P.-A., Jambon, F., André-Poyaud, I., Chardonnel, S., Lutoff, C., and Lbath, A. (2010b). Acquisition de connaissances sur les déplacements quotidiens des individus dans un contexte de risques naturels : Protocoles d'enquête à l'aide de technologies mobiles. In *Conférence SAGEO 2010, 17-19 Novembre 2010, Toulouse, France*.
- [2] **Christophe, S.** and Bucher, B. (2009). Un modèle de dialogue pour la conception de légendes cartographiques. In *XXVIIè Congrès INFORSID, 26-29 Mai 2009, Toulouse, France*, pages 363–379.
- [3] Dinguès, C., **Christophe, S.**, and Jolivet, L. (2009). Connaissances opérationnelles pour la conception automatique de légendes de carte. In Gandon, F., editor, *Actes des 20è Journées Francophones d'Ingénierie des Connaissances, IC2009, Plate-forme AFIA / Hammamet, Tunisie, 25-29 Mai 2009*, pages 253–264. Hammamet, Tunisie.
- [4] Masse, A. and **Christophe, S.** (2015b). Visualisation homogène du littoral à partir de données géographiques hétérogènes spatio-temporelles. In Baazaoui, H., Claramunt, C., and Haddad, M. R., editors, *Actes de la 11ème conférence internationale annuelle Spatial Analysis and GEOMatics, Hammamet, Tunisia, November 23th, 2015*, volume 1535 of *CEUR Workshop Proceedings*, pages 150–163.
- [5] Ory, J., **Christophe, S.**, Fabrikant, S. I., and Bucher, B. (2014). Caractérisation visuelle d'un style topographique. In *Actes du Colloque International de Géomatique et d'Analyse Spatiale (SAGEO 2014), Grenoble, France*.
- [6] Remy, C. and **Christophe, S.** (2015). Quels usages effectifs de l'information géographique volontaire pour la production et la gestion des services urbains ? In *Actes de la 11ème conférence internationale annuelle Spatial Analysis and GEOMatics, Hammamet, Tunisia, November 23th, 2015*, volume 1535, pages 120–134. COGIT, CEUR Workshop Proceedings.

Reuves nationales sans comité de lecture :

- [1] Brasebin, M., **Christophe, S.**, Buard, E., and Pelloie, F. (2015a). Base de connaissances pour gérer des styles de rendus 3d. *Cartes & Géomatique*, (226) :51–59.
- [2] **Christophe, S.** (2012b). Des connaissances pour plus de créativité dans le choix des couleurs de la légende (outil colorlegend). *Cartes & Géomatique - Revue du Comité Français de Cartographie*, 211 :9–21.
- [3] **Christophe, S.** (2012c). Du bon usage de la couleur en cartographie...et de l'originalité ? *Cartes & Géomatique - Revue du Comité Français de Cartographie*, 213 :139–144.
- [4] **Christophe, S.** (2008). Concevoir des légendes topographiques à l'aide de palettes de peintre. *Le Monde des Cartes, Comité Français de Cartographie, Juin 2008*, 196.
- [5] Hoarau, C., **Christophe, S.**, and Mustière, S. (2013a). Entre cartes topographiques et orthoimages - mélanger, combiner, fusionner ou emmêler ces géo-visualisations ? *Cartes & Géomatique - Revue du Comité Français de Cartographie*, 217 :87–99.
- [6] Kasbarian, A., Audusseau, A., Hoarau, C., and **Christophe, S.** (2012). CONCEPTION DE CARTES STYLISÉES : Exemple du Pop Art. *Cartes & Géomatique*, 213 :145–152.
- [7] Ory, J., **Christophe, S.**, Fabrikant, S. I., and Bucher, B. (2015a). Comment les utilisateurs reconnaissent-ils un style topographique ? *Cartes & Géomatique - Revue du Comité Français de Cartographie*, (226) :21–34.
- [8] Touya, G., **Christophe, S.**, and Hoarau, C. (2015). Problématiques de recherche autour de la notion de clutter en cartographie automatique. *Cartes & Géomatique - Revue du Comité Français de Cartographie*, 226 :91–100.

Communications orales :

- [1] Buard, E. and **Christophe**, S. (2012). Towards a data model of human and wildlife trajectories : describing individuals' movements with the help of time-geography concepts. In *Workshop on Time Geography, GISciences2012, Sept. 19-21, Columbus, Ohio, USA*.
- [2] **Christophe**, S. (2013). Aide à la conception de cartes et visualisations personnalisées : Questions de perception et de cognitions en suspense. Atelier SAGEO 2013 : Représentations cartographiques et Cognition : quelles perspectives de recherche?
- [3] **Christophe**, S., André-Poyaud, I., Chardonnel, S., Davoine, P., Jambon, F., Lbath, A., Lutoff, C., Mandran, N., and Meillon, B. (2010a). Human behaviour analysis during remarkable flood episodes : Proposition of automatic survey protocols based on mobile technologies. volume 13th AGILE International Conference on Geographic Information Science. Workshop on "Movement Research : are you in the flow ?" (position paper). 2010, May 10-14 , Guimarães, Portugal.
- [4] Duchêne, C., **Christophe**, S., and Ruas, A. (2009). Generalisation, semiotics and map evaluation : feedback from research done at cogit laboratory, ign france. In C Corbane, M Broglia, D. C. G. L. M. P., editor, *International workshop on Validation of geo-information products for crisis management (VALgEO'09)*, pages 101–110. Joint Research Center.
- [5] Duménieu, B. and **Christophe**, S. (2016). Integrating expressive rendering techniques in a gis cartographic pipeline. In *Agile 2016 Workshop 'Code Loves Maps', 2016 June, 14, Helsinki, Finland*.
- [6] Masse, A. and **Christophe**, S. (2016b). Geovisualisation of animated tides in coastal area with an opensource opengl platform. In *Agile 2016 Workshop 'Code Loves Maps', 2016 June, 14, Helsinki, Finland*.

Posters :

- [1] Brasebin, M., **Christophe**, S., Jacquinod, F., Vinasse, A., and Mahon, H. (2016b). Projet plu++ : vers un plan local d'urbanisme plus intelligible et plus participatif. In *Actes du Colloque International de Géomatique et d'Analyse Spatiale (SAGEO 2016)*.
- [2] **Christophe**, S. (2012d). Du bon usage de la couleur.... et de l'originalité? Journée Art et Cartographie, Besançon.
- [3] **Christophe**, S., Bucher, B., and Ruas, A. (2010b). Système coopératif à base de connaissances pour le choix de couleurs personnalisées et originales. In *21èmes journées Ingénierie des Connaissances (IC'10), 8-11 juin, Nîmes (France)*.
- [4] Ory, J., **Christophe**, S., and Fabrikant, S. I. (2013). Identification of styles in topographic maps. In *26th International Cartographic Conference (ICC 2013)*.

Thèse :

- [1] **Christophe**, S. (2009a). *Aide à la conception de légendes personnalisées et originales : proposition d'une méthode coopérative pour le choix des couleurs*. PhD thesis, Université Paris-Est.

Master :

- [1] **Christophe**, S. (2001). Détection et Caractérisation des alignements de bâtis en milieu urbain. Mémoire de DAA, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Rennes (ENSAR), IGN/COGIT.

Table des figures

1.1	Processus général	14
2.1	Schéma de l'approche de clustering des couleurs d'une peinture en K couleurs d'une palette (Christophe et al., 2013)	19
2.2	Octree à 64 couleurs en CIELab sur le tableau de Derain (Christophe et al., 2013)	20
2.3	Schéma du fonctionnement de notre méthode de classification hiérarchique ascendante et Octree à 64 couleurs en entrée (Christophe et al., 2013)	20
2.4	Visualisation des 16 et 64 clusters et couleurs de la palette Derain (Christophe et al., 2013)	21
2.5	Octree en 64 couleurs sur le tableau de van Gogh et visualisation des palettes à 16 et 64 couleurs (Christophe et al., 2013)	21
2.6	Evaluation des palettes issues du tableau de van Gogh (Christophe et al., 2013)	22
2.7	Familles chromatiques (Roussaffa, 2009; Christophe et al., 2011)	24
2.8	Exemples de combinaisons colorées (Roussaffa, 2009)	26
2.9	Application d'une même palette de couleurs à différents thèmes d'un même jeu de données géographiques (Roussaffa, 2009)	27
2.10	Peintures et palettes de référence (Christophe, 2009a)	29
2.11	Peinture de Matisse, sa palette et ses règles de composition (Christophe, 2011)	30
2.12	Représentation des contraintes cartographiques (à gauche) et artistiques (à droite) (Christophe, 2011)	30
2.13	Deux cartes possibles d'après Matisse : à gauche selon les règles de composition du peintre, à droite selon les règles d'usage en cartographie. (Christophe, 2011)	32
2.14	Cartes possibles à partir du tableau de van Gogh (Christophe, 2011)	33
2.15	Cartes possibles à partir du tableau de Derain (Christophe, 2011)	33
2.16	Cartes Pop Art à partir d'images Pop Art (Christophe and Hoarau, 2012)	35
2.17	Extrait de la grille d'évaluation ligne : spécification sémiologique / colonne : 1 type d'espace (colonne 1 : habitat dispersé; colonne 2 : zone côtière; colonne 3 : zone urbaine) (Christophe and Hoarau, 2012)	36
2.18	Saint Cast le Guildo en style Pop Art (Christophe and Hoarau, 2012)	37
2.19	Différentes présentations possibles pour sélectionner une spécification de couleurs pour Saint Cast le Guildo en style Pop Art (Christophe and Hoarau, 2012)	38
2.20	Variations en point sur le fond cartographique (Christophe and Hoarau, 2012)	38
2.21	4 structures de données possibles pour une même information spatio-temporelle représentée (Remy, 2014)	39
2.22	Modes de représentation possibles	41
2.23	Symbolisation des objets cartographiques	41
2.24	Étiquetage des objets cartographiques et liens de filiation	41
2.25	Gestion de l'intervisibilité des symboles en superposition	41
2.26	Spécifications de préservation (Remy, 2014)	42
2.27	Spécifications de lisibilité (Remy, 2014)	42
2.28	Spécifications de compréhensibilité (Remy, 2014)	42
2.29	Deux légendes de travail possibles (Remy, 2014)	43
2.30	Description du problème d'optimisation sous contraintes (Remy, 2014)	43
2.31	Structure du jeu de données et de la légende à représenter (à gauche); carte experte et mise en évidence des 4 agrégats cartographiques à résoudre (à droite). (Remy, 2014)	44
2.32	Cartes optimisées : score faible et score maximal (Remy, 2014)	45
2.33	Carte experte et carte optimisée avec score maximal (Remy, 2014)	45

2.34	Description du problème d'optimisation sous contraintes (Remy, 2014)	46
2.35	Cartes utilisées lors de l'expérimentation (Christophe, 2009a; Fabrikant et al., 2012) . . .	47
2.36	Classement des préférences des participants, de la plus attractive à la moins attractive (en haut); classement des réponses émotionnelles, de la plus forte à la moins forte (en bas) (Fabrikant et al., 2012)	48
2.37	Méthode coopérative de conception de légende (Christophe, 2009a)	50
2.38	Synthèse de la stratégie à base d'échantillons (Christophe, 2009a)	50
2.39	Synthèse de la stratégie à base de palettes de peintres (Christophe, 2009a)	51
2.40	Principe de l'outil de retouche (à gauche) et exemple d'implémentation pour la retouche de la végétation (à droite) (Christophe, 2009a)	52
2.41	Planche 1 d'échantillons cartographiques	52
2.42	Préférences sur la planche 1 d'échantillons cartographiques	53
2.43	Planche 2 d'échantillons cartographiques	53
2.44	Préférences sur la planche 2 d'échantillons cartographiques	53
2.45	Trois exemples de cartes résultantes	54
2.46	Diagramme de classes du modèle de dialogue (Christophe, 2009a)	58
3.1	Ce qu'on ne sait pas dessiner automatiquement et contrôler dans un SIG (motifs de texture, stylisation linéaire) (Christophe et al., 2016).	62
3.2	Sources d'inspiration pour l'expressivité des traits (stylisation linéaire) et pour les effets de dilution et aquarellisation en peinture (effets raster) (Christophe et al., 2016).	62
3.3	Approches pour catégoriser des cartes dans des styles (Christophe, 2012a)	66
3.4	Représentation du relief dans les cartes de Cassini	69
3.5	Représentation de la mer dans les cartes de Cassini	70
3.6	Représentation de la forêt dans les cartes de Cassini	70
3.7	Représentation des toponymes dans les cartes de Cassini	71
3.8	Visualisation OSM Boston par Stamen Design, mode OSM ou mode poster avec aquarellisation différentielle.	72
3.9	Carte de référence et carte aquarellisée (mode total mais les petites routes ont disparu) .	72
3.10	Derain	73
3.11	Pipeline de rendu mis en œuvre dans le cadre du projet MapStyle, GeOxygene. (Christophe et al., 2016)	74
3.12	Métadonnées de description des méthodes de rendu (Descripteur des méthodes de rendu), interface entre la description du style et les méthodes de rendu (Christophe et al., 2016; Duméniou and Christophe, 2016).	75
3.13	Stylisation linéaire : polyligne en entrée (a), tessellation (b), coordonnées de texture (c), application de la texture (d), calcul de la couleur avec un shader spécifique (e) (Christophe et al., 2016).	76
3.14	Variations sur la stylisation linéaire (Christophe et al., 2016; Duméniou and Christophe, 2016).	76
3.15	Validation inverse des outils de stylisation sur GeOxygene.	76
3.16	Variations sur le remplissage de surfaces par patches extraits dans différentes sources d'inspiration (Cassini, peinture, dessin à la main, etc.) (Christophe et al., 2016; Duméniou and Christophe, 2016).	77
3.17	Carte de Cassini vs. style Cassini sur données anciennes (Bertrand Duméniou).	78
3.18	Style Cassini sur données cartographiques au 100K (Bertrand Duméniou).	79
3.19	Premiers essais d'estampe, données 100K, Saint Jean de Luz (Bertrand Duméniou).	79
3.20	Estampe japonaise et stylisation de la mer (Bertrand Duméniou, Antoine Masse).	80
3.21	Aquarellisation, données 100K, Saint Jean de Luz	80
3.22	Principes de l'approche par combinaison de motifs (Loi et al., 2013; Loi, 2015)	82
3.23	Génération de textures vectorielles (Loi et al., 2013; Loi, 2015)	82
3.24	Génération de textures vectorielles pour la végétation (Loi, 2015)	83
3.25	Itérations majeures sur le design des textures (Loi, 2015).	84
3.26	Génération de textures vectorielles pour la montagne : 1)- génération d'éléments de textures (géométries), 2)- stylisation des éléments de textures, 3)- carte originale (Loi, 2015; Christophe et al., 2016).	85
3.27	Carte de l'Aiguille du Moine, 1/100000è, zones rocheuses dessinées automatiquement (Loi, 2015; Christophe et al., 2016).	85

3.28	Méthodologie proposée pour la géo-visualisation du littoral (Masse and Christophe, 2016a).	87
3.29	Stylisation du MNT en fonction de différentes sources d’inspiration (Masse and Christophe, 2016b).	88
3.30	Extraits du rendu final animé de la géovisualisation du littoral à plusieurs états de marée dans l’estuaire de Lanildut : représentation abstraite continue par couleurs conventionnelles de la profondeur d’eau. (Masse and Christophe, 2016a).	88
3.31	Extraits du rendu final animé de la géovisualisation du littoral à plusieurs états de marée dans l’estuaire de Lanildut : représentation ortho-photo-réaliste continue par couleurs naturelles de la profondeur d’eau. (Masse and Christophe, 2016a).	89
3.32	Processus global de conception d’un continuum de représentations topographiques (Hoarau and Christophe, 2016)	91
3.33	Effets de texture, couleurs et transparence pour une symbolisation de la végétation (Hoarau, 2015; Hoarau and Christophe, 2016).	92
3.34	Interpolation de couleurs entre une carte topographique classique et une carte topographique en couleurs naturelles (Hoarau and Christophe, 2016).	92
3.35	Interpolation de couleurs entre une ortho-image et sa version en niveaux de gris (Hoarau, 2015; Hoarau and Christophe, 2016).	92
3.36	Interpolation de texture <i>naturelle</i> sur le thème mer, par alpha blending sur l’ortho-image (Hoarau, 2015; Hoarau and Christophe, 2016).	93
3.37	Interpolation de texture <i>procédurale</i> sur le thème végétation, par augmentation de la quantité de texture (Hoarau, 2015; Hoarau and Christophe, 2016).	93
3.38	Point de contrôle possible pour la représentation de la mer entre sa représentation dans une ortho-image et dans une carte. Les petits carrés donnent pour chaque représentation la présence/absence d’une texture et sa couleur (Hoarau and Christophe, 2016).	94
3.39	2 chemins graphiques possibles à l’aide de blocs d’interpolation de couleurs et textures, pour la représentation de la végétation (Hoarau, 2015; Hoarau and Christophe, 2016).	94
3.40	Paramétrisation du continuum cartographique de la figure 3.41 entre une carte topographique et une ortho-image (Hoarau, 2015; Hoarau and Christophe, 2016).	95
3.41	Continuum cartographique avec les paramètres présentés ci-dessus (Hoarau, 2015; Hoarau and Christophe, 2016).	96
3.42	Pipeline global de notre approche (Brasebin et al., 2016a).	97
3.43	4 styles de rendu possibles (Vinesse, 2016).	99
3.44	Pipeline de rendu 3D (Vinesse, 2016).	99
3.45	Modèle de description des données et modèle de stylisation (Vinesse, 2016).	100
3.46	Interface de l’application de stylisation 3D (Vinesse, 2016).	100
3.47	Généralisation progressive du <i>contexte</i> , avec un <i>focus</i> typique : bâtiments discrets (blocs généralisés), image du haut ; bâtiments discrets (préservation de la forme générale), image du milieu ; bâtiments photo-réalistes, image du bas (Vinesse, 2016; Brasebin et al., 2016a).	101
3.48	Effet de la différenciation des murs et des toits d’un <i>focus</i> style discret, avec un <i>contexte</i> photo-réaliste : différenciation en haut de l’image, pas de différenciation en bas de l’image (Vinesse, 2016; Brasebin et al., 2016a).	101
3.49	Différents styles de co-visualisations possibles (Vinesse, 2016).	101
3.50	Évolution au cours du temps des styles topographiques 25K de l’IGN (à gauche) et de Swisstopo (à droite) (Ory et al., 2013).	103
3.51	Comparaison des styles topographiques IGN (en haut) et Swisstopo (en bas) appliqués à la ville de Thonon-les-Bains, Haute-Savoie, France (Ory et al., 2013).	104

Bibliographie

- Albers, J. (1963). *Interaction of colors*. Yale University Press, New Haven.
- Audusseau, A. and Kasbarian, A. (2012). Conception de cartes stylisées. Rapport initiation à la recherche, Ecole Nationale des Sciences géographiques, ING2.
- Balley, S., Baella, B., Christophe, S., Pla, M., Regnaud, N., and Stoter, J. (2014). Map specifications and user requirements. In Burghardt, D., Duchêne, C., and Mackaness, W., editors, *Abstracting Geographic Information in a Data Rich World*, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, pages 17–52. Springer International Publishing.
- Barla, P. (2006). *Representation and acquisition models for expressive rendering*. Theses, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG.
- Barla, P., Thollot, J., and Thomas, G. (2007). Rendu expressif. In Péroche, B. and Bechmann, D., editors, *Informatique graphique et rendu*. Hermès - Lavoisier.
- Berlyne, D. (1974). *Studies in the New Experimental Aesthetics : Steps Toward an Objective Psychology of Aesthetic Appreciation*. Wiley, New York, NY, USA.
- Bertin, J. (1967). *Sémiologie Graphique : les diagrammes, les réseaux, les cartes*. Paris Mouton.
- Bessadok, F. and Dominguès, C. (2011). Automatic evaluation and improvement of map readability. In *25th International Cartographic Conference (ICC2011), 2011 July, 2-8, Paris, France*.
- Board, C. (1991). Report of the ICA Working Group on Cartographic Definitions. *The Cartographic Journal*, 28(2) :249–250.
- Boucsein, W. (1992). *Electrodermal activity*. Springer, Berlin, Germany.
- Boulanger, L. (2014). Vers un style Cassini : méthodologie pour automatiser le rendu Cassini. Master's thesis, Université Paris 1 - ENSG, M2 Carthagéo.
- Bousseau, A., Kaplan, M., Thollot, J., and Sillion, F. (2006). Interactive watercolor rendering with temporal coherence and abstraction.
- Brasebin, M., Christophe, S., Buard, E., and Pelloie, F. (2015a). Base de connaissances pour gérer des styles de rendus 3d. *Cartes & Géomatique*, (226) :51–59.
- Brasebin, M., Christophe, S., Buard, E., and Pelloie, F. (2015b). A knowledge base to classify and mix 3d rendering styles. *Brazilian Society of Cartography, Geodesy, Photogrammetry and Remote Sensing*, 5(67) :1067–1077. Special Issue 27th ICC.
- Brasebin, M., Christophe, S., Jacquinod, F., Vinesse, A., and Mahon, H. (2016a). 3d geovisualization & stylization to manage comprehensive and participative local urban plans. In *11th 3D Geoinfo Conference*, ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., IV-2-W1, pages 83–91.
- Brasebin, M., Christophe, S., Jacquinod, F., Vinesse, A., and Mahon, H. (2016b). Projet plu++ : vers un plan local d'urbanisme plus intelligible et plus participatif. In *Actes du Colloque International de Géomatique et d'Analyse Spatiale (SAGEO 2016)*.
- Brasebin, M., Perret, J., and Haëck, C. (2011). Towards a 3D geographic information system for the exploration of urban rules : application to the French local urban planning schemes. In *28th urban data management symposium (UDMS 2011)*.

- Brasebin, M., Perret, J., Mustière, S., and Weber, C. (2016c). A generic model to exploit urban regulation knowledge. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 5(2) :14.
- Brasebin, M., Perret, J., and Reuillon, R. (2015c). Stochastic buildings generation to assist in the design of right to build plans. In *Joint International Geoinformation Conference 2015 - 3D GeoInfo*.
- Brédif, M. (2014). Projective texturing uncertain geometry : silhouette-aware box-filtered blending using integral radial images. In *ASPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS Technical Commission III Symposium*, volume II-3, Zurich, Switzerland.
- Brédif, M. and Tournaire, O. (2012). libjmcmmc : An open-source generic c++ library for stochastic optimization. In *XXnd Congress of the ISPRS*, Melbourne, Australia.
- Brewer, C. A. (1992). Review of colour terms and simultaneous contrast research for cartography. *Cartographica*, 29(3&4) :20–30.
- Brewer, C. A. (1994a). Guidelines for use of the perceptual dimensions of color for mapping and visualization. In Bares, J., editor, *Color hard copy and graphic arts III, Proceedings of the international society for optical engineering (SPIE), San Jose, February 2004.*, volume 2171, pages 54–63.
- Brewer, C. A. (1994b). *Visualization in modern cartography*, chapter 7 - Color use guidelines for mapping and visualization, pages 123–147. A.M. Mac Eachren and D.R.F. Taylor, Elsevier Science, Tarrytown, NY.
- Brewer, C. A. (2003). A Transition in Improving Maps : The ColorBrewer Example. *Cartography and Geographic Information Science*, 30(2) :159–162.
- Brewer, C. A. (2005). *Designing better maps : a guide for GIS Users*. Esri Press, Redlands, CA, USA.
- Brewer, C. A., Hatchard, G. W., and Harrower, M. A. (2003). ColorBrewer in Print : A Catalog of Color Schemes for Maps. *Cartography and Geographic Information Science*, 30(1) :5–32.
- Brock, A., Kammoun, S., Macé, M., and Jouffrais, C. (2014). Using wrist vibrations to guide hand movement and whole body navigation. *i-com*, 13(3).
- Brock, A. M., Truillet, P., Oriola, B., Picard, D., and Jouffrais, C. (2015). Interactivity Improves Usability of Geographic Maps for Visually Impaired People. *Human-Computer Interaction*, 30(2) :156–194.
- Brychtová, A., Çöltekin, A., and Pászto, V. (2016). Do the visual complexity algorithms match the generalization process in geographical displays? *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B2 :375–378.
- Buard, E. and Christophe, S. (2012). Towards a data model of human and wildlife trajectories : describing individuals' movements with the help of time-geography concepts. In *Workshop on Time Geography, GISciences2012, Sept. 19-21, Columbus, Ohio, USA*.
- Buard, E. and Ruas, A. (2007). Evaluation of colour contrasts by means of expert knowledge for on-demand mapping. In *23th ICA conference - 4-10 August 2007, Moscow, Russia*.
- Buard, E. and Ruas, A. (2009). Processes for improving the colours of topographic maps in the context of Map-on-Demand. In *24th ICA conference - 14-19 November 2009, Santiago de Chile, Chile*.
- Buchotte (1722). *Les règles du dessin et du lavis pour les plans particuliers des ouvrages et des bâtimens*. Chez Claude Jombert, Paris.
- Caelen, J. (2002). *Dialogue homme-machine et interaction multimodale : une logique dialogique*. Laboratoire d'Informatique de Grenoble.
- Caelen, J. (2003). Stratégies de dialogue. In Cépadues, editor, *Conférence MFI'03 (Modèles Formels de l'Interaction)*, Lille, pages 29–39.
- Caelen, J. (2004a). *Modèles de tâches*.
- Caelen, J. (2004b). *Stratégies de dialogue et buts*. Laboratoire d'Informatique de Grenoble.

- Caelen, J. and Xuereb, A. (2007). *Interaction et pragmatique*. Collection Sciences Informatique et SHS, Hermès, Lavoisier.
- Cassini de Thury, C.-F. (1783). *La description géométrique de la France*. Paris : Imprimerie de J. Ch. Desaint.
- Cauvin, C., Escobar, F., and Serradj, A. (2008). *Cartographie Thématique " Des voies nouvelles à explorer "*, Vol.5. Traité IGAT. HERMES-Sciences, Lavoisier.
- Cfc (1990). Glossaire de Cartographie. *Le Monde des Cartes, Comité Français de Cartographie, Mars-Juin 1990*, 123-124.
- Chatterjee, A. (2010). Neuroaesthetics : A coming of age story. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23(10) :53–62.
- Chesneau, E. (2006). *Modèle d'amélioration automatique des contrastes de couleurs en cartographie*. PhD thesis, 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)*.
- Chevreur, E. (1839). *De la loi du contraste simultané des couleurs et de l'assortiment des objets colorés*. Pitois-Levrault et Cie, Paris.
- Christophe, S. (2001). Détection et Caractérisation des alignements de bâtis en milieu urbain. Mémoire de daa, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Rennes (ENSAR).
- Christophe, S. (2007a). A Web dialogue for creative portrayal. In *23rd International Cartographic Conference (ICC'07), 4-10 Août 2007, Moscou, Russie*.
- Christophe, S. (2007b). Legend design by a novice user on the web. In *5th Geographic Information Days (GIDAYS'07), 10-12 Septembre 2007, Münster, Allemagne*.
- Christophe, S. (2008a). Concevoir des légendes topographiques à l'aide de palettes de peintre. *Le Monde des Cartes, Comité Français de Cartographie, Juin 2008*, 196.
- Christophe, S. (2008b). Creative cartography based on dialog. In *AutoCarto 2008, Sept. 8-10, Shepherdstown, WV, USA*.
- Christophe, S. (2008c). Legend Design on the Web : creating accurate styles. *International Journal of Spatial Data Infrastructures Research (IJS DIR) Special Issue Vol.3, GI-DAYS 2007, Muenster : Young Researchers Forum. Guest Editors : Florian Probst and Carsten Kessler*.
- Christophe, S. (2009a). *Aide à la conception de légendes personnalisées et originales : proposition d'une méthode coopérative pour le choix des couleurs*. PhD thesis, Université Paris-Est.
- Christophe, S. (2009b). *Cartography and Art : Making Legends By Means of Painters' Palettes*, chapter 8- Making Legends By Means of Painters' Palettes, pages 81–92. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Springer Berlin Heidelberg.
- Christophe, S. (2010). Aide à la conception de légendes personnalisées et originales. *Mappemonde*, 99(3).
- Christophe, S. (2011). Creative Colours Specification Based on Knowledge (COLorLEGend system). *Cartographic Journal, The*, 48(2) :138–145.
- Christophe, S. (2012a). Cartographic Styles between traditional and original (towards a cartographic style model). In *AutoCarto2012, 16-18 September, Columbus, Ohio, USA*.
- Christophe, S. (2012b). Des connaissances pour plus de créativité dans le choix des couleurs de la légende (outil colorlegend). *Cartes & Géomatique - Revue du Comité Français de Cartographie*, 211 :9–21.
- Christophe, S. (2012c). Du bon usage de la couleur en cartographie...et de l'originalité? *Cartes & Géomatique - Revue du Comité Français de Cartographie*, 213 :139–144.
- Christophe, S. (2012d). Du bon usage de la couleur... et de l'originalité? Journée Art et Cartographie, Besançon.

- Christophe, S. (2013). Aide a la conception de cartes et visualisations personnalisées : Questions de perception et de cognitions en suspense. *Atelier SAGEO 2013 : Représentations cartographiques et Cognition : quelles perspectives de recherche?*
- Christophe, S. (2014). Current issues of perception and cognition in map design. In Jan Brus, Alena Vondráková, V. V. U. P. K. g., editor, *CartoCon Conference 2014, Olomouc, Czech Republic*. Palacky University, 2014, CartoCON 2014 : Olomouc, Czech Republic, : Conference Proceedings : [abstract Proceedings.
- Christophe, S., André-Poyaud, I., Chardonnel, S., Davoine, P., Jambon, F., Lbath, A., Lutoff, C., Mandran, N., and Meillon, B. (2010a). Human behaviour analysis during remarkable flood episodes : Proposition of automatic survey protocols based on mobile technologies. volume 13th AGILE International Conference on Geographic Information Science. Workshop on “Movement Research : are you in the flow?” (position paper). 2010, May 10-14 , Guimarães, Portugal.
- Christophe, S. and Bucher, B. (2009). Un modèle de dialogue pour la conception de légendes cartographiques. In *XXVIIè Congrès INFORSID, 26-29 Mai 2009, Toulouse, France*, pages 363–379.
- Christophe, S., Bucher, B., and Ruas, A. (2007). Une application de dialogue pour des légendes créatives. *Le Monde des Cartes - Revue du Comité Français de Cartographie*, 194.
- Christophe, S., Bucher, B., and Ruas, A. (2010b). Système coopératif à base de connaissances pour le choix de couleurs personnalisées et originales. In *21èmes journées Ingénierie des Connaissances (IC'10), 8-11 juin, Nîmes (France)*.
- Christophe, S., Davoine, P.-A., Jambon, F., André-Poyaud, I., Chardonnel, S., Lutoff, C., and Lbath, A. (2010c). Acquisition de connaissances sur les déplacements quotidiens des individus dans un contexte de risques naturels : Protocoles d'enquête à l'aide de technologies mobiles. In *Conférence SAGEO 2010, 17-19 Novembre 2010, Toulouse, France*.
- Christophe, S., Dumenieu, B., Hoarau, C., Ory, J., Masse, A., Brédif, M., Vanderhaeghe, D., Thollot, J., Hurtut, T., Mellado, N., and Turbet, J. (2017a). Expressive map design : Ogc sld/se++ extension for expressive map styles. In *28th International Cartographic Conference, Washington DC, USA*.
- Christophe, S., Duménieu, B., Turbet, J., Hoarau, C., Mellado, N., Ory, J., Loi, H., Masse, A., Arbelot, B., Vergne, R., Brédif, M., Hurtut, T., Thollot, J., and Vanderhaeghe, D. (2016). Map Style Formalization : Rendering Techniques Extension for Cartography. In Bénard, P. and Winnemöller, H., editors, *Non-Photorealistic Animation and Rendering*. The Eurographics Association.
- Christophe, S. and Hoarau, C. (2012). Expressive map design based on Pop Art : Revisit of Semiology of Graphics? *Cartographic Perspectives*, 73.
- Christophe, S., Hoarau, C., Kasbarian, A., and Audusseau, A. (2012). A framework to make Pop Art map design. In *GIScience2012, Sept. 19-21, Columbus, Ohio, USA*.
- Christophe, S., Loi, H., Thollot, J., Vergne, R., Hurtut, T., Lecordix, F., and Brédif, M. (2017b). Texture generation for expressive rock drawing. In *28th International Cartographic Conference, Washington DC, USA*.
- Christophe, S., Perret, J., and Hoarau, C. (2013). Extraction de palettes de couleurs pour l'aide à la conception cartographique. *Technique et Science Informatiques, Revue des sciences et technologies de l'information*, 32(3-4) :401–430.
- Christophe, S. and Ruas, A. (2002). Detecting Building Structures for generalisation purposes. *Spatial Data Handling 02, Ottawa, Canada*.
- Christophe, S. and Ruas, A. (2009). A process to design creative legend on-demand. In *24th ICA Conference - 14-19 Novembre 2009, Santiago du Chili, Chili*.
- Christophe, S., Zanin, C., and Roussaffa, H. (2011). Colours Harmony in Cartography. In *25th International Cartographic Conference (ICC2011), 2011 July, 2-8, Paris, France*.
- Cohen-Or, D., Sorkine, O., Gal, R., Leyvand, T., and Xu, Y.-Q. (2006). Color harmonization. *ACM Transactions on Graphics (Proceedings of ACM SIGGRAPH)*, 25(3) :624–630.

- Curtis, C. J., Anderson, S. E., Seims, J. E., Fleischer, K. W., and Salesin, D. H. (1997). Computer-generated watercolor. In *Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH '97, pages 421–430, New York, NY, USA. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- Dh e, F. (2011). Amélioration des cartes topographiques pour les daltoniens. In *25th International Cartographic Conference (ICC'011)*, Paris.
- Dominguès, C. and Bucher, B. (2006). Legend design based on map samples. In Raubal, M., Miller, H. J., Frank, A. U., and Goodchild, M. F., editors, *Geographic Information Science, Fourth International Conference, GIScience 2006, Münster, Germany, September 2006, Extended abstracts*, pages 55–59.
- Dominguès, C., Christophe, S., and Jolivet, L. (2009). Connaissances op erATIONnelles pour la conception automatique de légendes de carte. In Gandon, F., editor, *Actes des 20  Journées Francophones d'Ingénierie des Connaissances, IC2009, Plate-forme AFIA / Hammamet, Tunisie, 25-29 Mai 2009*, pages 253–264. Hammamet, Tunisie.
- Drevon, G., Jambon, F., Chardonnel, S., Christophe, S., André-Poyaud, I., Davoine, P.-A., and Lutoff, C. (2015).  valuation comparée de l'apport de l'assistance gps aux enquêtes de mobilité. *Netcom – Réseaux, communication, Territoire - Représenter des populations et des territoires en mouvement*, 28(1/2) :0987–6014.
- Ducasse, J., Mac e, M., and Jouffrais, C. (2015). From open geographical data to tangible maps : Improving the accessibility of maps for visually impaired people. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-3/W3 :517–523.
- Duchêne, C., Christophe, S., and Ruas, A. (2009). Generalisation, semiotics and map evaluation : feedback from research done at cogit laboratory, ign france. In C Corbane, M Broglia, D. C. G. L. M. P., editor, *International workshop on Validation of geo-information products for crisis management (VALgEO'09)*, pages 101–110. Joint Research Center.
- Duchêne, C., Christophe, S., and Ruas, A. (2011). Generalisation, symbol specification and map evaluation : feedback from research done at COGIT laboratory, IGN France. *International Journal of Digital Earth*, 4(sup1) :25–41.
- Duménieu, B. and Christophe, S. (2016). Integrating expressive rendering techniques in a gis cartographic pipeline. In *Agile 2016 Workshop 'Code Loves Maps', 2016 June, 14, Helsinki, Finland*.
- Dumont, M., Touya, G., and Duchêne, C. (2015). Automated generalisation of intermediate levels in a multi-scale pyramid. In *Proceedings of 18th ICA Workshop on Generalisation and Multiple Representation*, Rio de Janeiro, Brazil.
- Dumont, M., Touya, G., and Duchêne, C. (2016). Assessing the variation of visual complexity in multi-scale maps with clutter measures. In *Proceedings of AGILE workshop on "Automated generalisation for on-demand mapping" and 19th ICA Workshop on Generalisation and Multiple Representation*, Helsinki, Finland.
- Fabrikant, S. I. (2005). Towards an understanding of geovisualization with dynamic displays : Issues and Prospects. In *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, Mar. 21-23, 2005*, pages 667–690. Dykes, J. and MacEachren, A.M. and Kraak M. J. (eds).
- Fabrikant, S. I., Christophe, S., Papastefanou, G., and Maggi, S. (2012). Emotional response to map design aesthetics. In *GISciences2012, Sept. 19-21, Columbus, Ohio, USA*.
- Fabrikant, S. I., Christophe, S., Papastefanou, G., and Maggi, S. (2013). How to measure and visualize emotion when using maps. In *26th International Cartographic Conference (ICC'13), Dresden, Germany*.
- 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 Coru na, Spain, Jul. 9-16, 2005. (refereed extended abstract)*.

- 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.
- Gage, J. (2006). *Colour in Art*. Thames & Hudson World of Art.
- Geisthovel R., H. L. (2015). Automatic rock depiction via relief shading.
- Gervautz, M. and Purgathofer, W. (1988). *New Trends in Computer Graphics*, chapter A simple method for color quantization : Octree quantization. Academic Press Professional, Inc., San Diego, CA, USA.
- Golomb, S. and Baumert, L. (1965). Backtrack programming. *Journal of the Association for Computing Machinery*, 12 :516–524.
- Harrower, M. A. and Brewer, C. A. (2003). ColorBrewer.org : An Online Tool for Selecting Color Schemes for Maps. *The Cartographic Journal*, 40(1) :27–37.
- Hoarau, C. (2011). Reaching a Compromise between Contextual Constraints and Cartographic Rules : Application to Sustainable Maps. *Cartography and Geographic Information Society Journal*, 38(2) :79–88.
- Hoarau, C. (2012). Orthoimage or map visualization in use in geoportals, Case study on the French Geoportal. In *AutoCarto2012, Sept. 16-8, Columbus, Ohio, USA*.
- Hoarau, C. (2015). *Représentations cartographiques intermédiaires - Comment co-visualiser une carte et une orthophotographie pour naviguer entre abstraction et réalisme ?* PhD thesis, Université Paris Est.
- Hoarau, C. and Christophe, S. (2015). Color and texture interpolation between orthoimagery and vector data. In *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and the Spatial Information Sciences*, volume II-3/W5.
- Hoarau, C. and Christophe, S. (2016). Cartographic continuum rendering based on color and texture interpolation to enhance photo-realism perception. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, in press :–.
- Hoarau, C., Christophe, S., and Mustière, S. (2013a). Entre cartes topographiques et orthoimages - mélanger, combiner, fusionner ou emmêler ces géo-visualisations? *Cartes & Géomatique - Revue du Comité Français de Cartographie*, 217 :87–99.
- Hoarau, C., Christophe, S., and Mustière, S. (2013b). Mixing, blending, merging or scrambling topographic maps and orthoimagery in geovisualizations? In *26th International Cartographic Conference (ICC'13), 25-30 August, Dresden (Germany)*.
- Hoarau, C., Christophe, S., and Mustière, S. (2015). Sliding from imagery realism to topographic abstraction. In *27th International Cartographic Conference (ICC'15), Aug. 23-28, Rio de Janeiro, Brasil*.
- Hurni, L., Dahinden, T., and Hutzler, E. (2001). Digital Cliff Drawing for Topographic Maps : Traditional Representations by Means of New Technologies. *Cartographica : The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 38(1-2) :55–65.
- ISO9241-11 (1998). Exigences ergonomiques pour travail de bureau avec terminaux à écrans de visualisation (TEV) – Partie 11 : lignes directrices relatives à l'utilisabilité.
- Itten, J. (1967). *Art de la couleur*. Editions Dessain et Tolra, Paris, Edition originale en 1961 : Kunst der Farbe, Traduction en français en 1967, puis en 2001.
- Itten, J. (1977). *Art de la couleur*. Editions Dessain et Tolra, Paris.
- Jacquinod, F. (2014). *Production, pratique et usages des géovisualisations 3D dans l'aménagement du territoire*. PhD thesis, Université de Saint-Etienne.
- Jacquinod, F. and Joliveau, T. (2014). La carte en action : l'efficacité performative de la carte au service de la réflexion sur l'urbain. réflexions tirées de l'observation de l'utilisation de géovisualisations 3d. In *Symposium International Eidolon - Cartographier l'intelligence urbaine, 3 - 4 juillet 2014, Québec, Canada*.

- Jégou, L. and Deblonde, J.-P. (2012). Vers une visualisation de la complexité de l'image cartographique. *Cybergeogeo*.
- Jenny, B., Gilgen, J., Geisthövel, R., Marston, B. E., and Hurni, L. (2014). Design Principles for Swiss-style Rock Drawing. *The Cartographic Journal*, 51(4) :360–371.
- Josselin, D., Saidi, A., Roussel, D., Boularouk, S., Bonin, O., Altman, E., and Matrouf, D. (2016). Sonorous cartography for sighted and blind people. In *AGILE'2016*, Helsinki, Finland.
- Kandinsky, V. (1989). *Du spirituel dans l'art et dans la peinture en particulier*. Version originale 1910, Paris, Denoël, collection. folio / essais.
- Kasbarian, A., Audusseau, A., Hoarau, C., and Christophe, S. (2012). CONCEPTION DE CARTES STYLISÉES : Exemple du Pop Art. *Cartes & Géomatique*, 213 :145–152.
- Kent, A. J. (2005). Aesthetics : A Lost Cause in Cartographic Theory? *Cartographic Journal, The*, 42(2) :182–188.
- Klippel, A., Hardisty, F., Li, R., and Weaver, C. (2009). Color Enhanced Star Plot Glyphs. Can Salient Shape Characteristics be Overcome? *Cartographica*, 44(3) :217–232.
- Koffka, K. (1935). *Principles of Gestalt Psychology*. New York : Harcourt, Brace & Co.
- Kohler, W. (1947). *Gestalt psychology*. New York : Liveright.
- Kwatra, V., Schödl, A., Essa, I., Turk, G., and Bobick, A. (2003). Graphcut textures : Image and video synthesis using graph cuts. *ACM Transactions on Graphics, SIGGRAPH 2003*, 22(3) :277–286.
- Lafay, S., Braun, A., Chandler, D., Michaud, M., Ricaud, L., and Mustière, S. (2015). Automatic mapping and innovative on-demand mapping services at ign france. *Cartography and Geographic Information Science*, 42(1) :54–68.
- Langran, G. (1992). *Time in information geographic systems*. Londres : Taylor and Francis. Sciences. Chicago : University of Chicago Press.
- Loi, H. (2015). *Synthèse programmable de textures vectorielles et application à la cartographie*. PhD thesis, Université Grenoble Alpes.
- Loi, H., Hurtut, T., Vergne, R., and Thollot, J. (2013). Discrete texture design using a programmable approach. In *ACM SIGGRAPH 2013 Talks*, SIGGRAPH '13, New York, NY, USA. ACM.
- MacEachren, A. M. (1995). *How maps work : Representation, Visualization, and Design*. Guilford Publications, New York.
- MacQueen, J. B. (1967). Some Methods for classification and Analysis of Multivariate Observations. In *Proceedings of 5-th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Berkeley, University of California Press*, volume 1, pages 281–297.
- Mallet, C., Paparoditis, N., Dowman, I., Oude Elberink, S., Olteanu-Raimond, A.-M., Rottensteiner, F., Yang, M.-H., Christophe, S., Çöltekin, A., and Brédif, M. (2015a). *Proceedings of the ISPRS Geospatial Week 2015*, volume II-3/W5. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, La Grande Motte, France.
- Mallet, C., Paparoditis, N., Dowman, I., Oude Elberink, S., Olteanu-Raimond, A.-M., Sithole, G., Rabatel, G., Rottensteiner, F., Briottet, X., Christophe, S., Çöltekin, A., and Patané, G. (2015b). *Proceedings of the ISPRS Geospatial Week 2015*, volume XL-3/W3. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, La Grande Motte, France.
- Masse, A. and Christophe, S. (2015a). Geovisualization of coastal areas from heterogeneous spatio-temporal data. In *ISPRS Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, volume Vol. XL-3/W3.
- Masse, A. and Christophe, S. (2015b). Visualisation homogène du littoral à partir de données géographiques hétérogènes spatio-temporelles. In Baazaoui, H., Claramunt, C., and Haddad, M. R., editors, *Actes de la 11ème conférence internationale annuelle Spatial Analysis and GEomatics, Hammamet, Tunisia, November 23th, 2015*, volume 1535 of *CEUR Workshop Proceedings*, pages 150–163.

- Masse, A. and Christophe, S. (2016a). Améliorer la perception du réalisme dans la géovisualisation du littoral - utilisation de données spatio-temporelles hétérogènes. *Revue Internationale de Géomatique*.
- Masse, A. and Christophe, S. (2016b). Geovisualisation of animated tides in coastal area with an open-source opengl platform. In *Agile 2016 Workshop 'Code Loves Maps', 2016 June, 14, Helsinki, Finland*.
- Mersey, J. (1990). Colour and Thematic Map Design : The Role of Colour Scheme and Map Complexity in Choropleth Map Communication. *Cartographica, Monograph 41*, 27(3).
- Mollard-Desfour, A. (1998). *Le dictionnaire des mots et expressions de couleur - Le Bleu*. CNRS Editions.
- Morrison, J. L. (1974). A theoretical framework for cartographic generalization with the emphasis on the process of symbolization. *International Yearbook of Cartography*, 14 :115–127.
- Murphy, C. (2015). Intellectual Highlighting of Remote Sensing Imagery for Better Image Map Design. In *Proc. of 27th International Cartographic Conference, Rio de Janeiro, Brazil, August 23-28, 2015*.
- Nielsen, J. (1993). *Usability Engineering*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA.
- Nussbaum, L. and Unamuno, V. (2000). Fluidité et complexité dans la construction du discours entre apprenants de langues étrangères. *Acquisition et interaction en langue étrangère [En ligne], Approches interactionnistes de l'acquisition des langues étrangères, Mis en ligne le : 16 décembre 2005*, 12.
- Ory, J. (2016). *Connaissances pour la conception et la perception de styles topographiques*. PhD thesis, Université Paris-Est, IGN/LaSTIG.
- Ory, J., Christophe, S., and Fabrikant, S. I. (2013). Identification of styles in topographic maps. In *26th International Cartographic Conference (ICC 2013)*.
- Ory, J., Christophe, S., Fabrikant, S. I., and Bucher, B. (2014). Caractérisation visuelle d'un style topographique. In *Actes du Colloque International de Géomatique et d'Analyse Spatiale (SAGEO 2014), Grenoble, France*.
- Ory, J., Christophe, S., Fabrikant, S. I., and Bucher, B. (2015a). Comment les utilisateurs reconnaissent-ils un style topographique? *Cartes & Géomatique - Revue du Comité Français de Cartographie*, (226) :21–34.
- Ory, J., Christophe, S., Fabrikant, S. I., and Bucher, B. (2015b). How do map readers recognize a topographic mapping style? *The Cartographic Journal*, 52(2) :193–203.
- Ou, L.-C. and Luo, M. R. (2006). A colour harmony model for two-colour combinations. *Color Res. Appl.*, 31(3) :191–204.
- Palmer, S. E. (1992). Common region : A new principle of perceptual grouping. *Cognitive Psychology*, 24(3) :436 – 447.
- Palmer, S. E. and Schloss, K. B. (2010). An ecological valence theory of human color preference. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(19) :8877–8882.
- Papastefanou, G. (2009). Ambulatorisches assessment : Eine methode (auch) für die empirische sozialforschung. *Österreichische Zeitschrift für Soziologie*, 9 :443–469.
- Pastoureau, M. (1992). *Dictionnaire des couleurs de notre temps : symbolique et société*. Paris : Bonneton.
- Patte, P. (1769). *Mémoires sur les objets les plus importants de l'architecture*. Rozet (Paris).
- Pelletier, M. (2013). *Les cartes de Cassini : la science au service de l'état et des provinces*, volume 2è édition. Comité des travaux historiques et scientifiques - cths edition.
- Perlin, K. (1985). An image synthesizer. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 19(3) :287–296.
- Petit, T. (2002). *Modélisation et algorithmes de résolution des problèmes sur-contraints*. PhD thesis, Université Montpellier II.
- Raposo, P. and Brewer, C. A. (2011). Comparison of topographic map designs for overlay on orthoimage backgrounds. In *25th International Cartographic Conference*.

- Rautenbach, V., Çöltekin, A., and Coetzee, S. (2015). Exploring the impact of visual complexity levels in 3d city models on the accuracy of individuals' orientation and cognitive maps. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-3/W5 :499–506.
- Regnault, N. (1998). *Généralisation du Bâti : structure spatiale de type graphe et représentation cartographique*. PhD thesis, Université de Provence - Aix-Marseille 1.
- Reichenbacher, T. and Swienty, O. (2007). Attention-Guiding Geovisualisation. In *10th AGILE International Conference on Geographic Information Science 2007, Aalborg University, Denmark*.
- Remy, C. (2014). Sémiologie graphique pour la représentation des dynamiques urbaines - Identification et modélisation de connaissances pour la conception de cartes diachroniques efficaces en superposition. Application à l'évolution du bâti en milieu urbain. Master's thesis, Université Paris-Est Marne la Vallée - ENSG.
- Remy, C. and Christophe, S. (2015). Quels usages effectifs de l'information géographique volontaire pour la production et la gestion des services urbains? In *Actes de la 11ème conférence internationale annuelle Spatial Analysis and GEomatics, Hammamet, Tunisia, November 23th, 2015*, volume 1535, pages 120–134. COGIT, CEUR Workshop Proceedings.
- Robinson, A. H., Morrison, J. L., Muehrcke, P. C., Guptill, S. C., and Kimerling, A. J. (1995). *Elements of cartography, Sixth Edition*. John Wiley & Sons, Inc.
- Rock, I. (1983). *The logic of perception*. Cambridge, MA : MIT Press.
- Roque, G. (2009). *Art et science de la couleur*. Gallimard 1997, réédition 2009.
- Roussaffa, H. (2009). Caractérisation de l'harmonie dans une carte. Mémoire de master 1, Université Paris Diderot Paris7, Master 1 Carthagéo.
- Russel, S. and Norvig, P. (2006). *Intelligence Artificielle*. 2è édition - Pearson Education.
- Sauvaget, C., Manuel, S., Vittaut, J.-N., Suarez, J., and Boyer, V. (2010). Automated Colorization of Segmented Images Based on Color Harmony. *Journal of Multimedia Processing and Technology*, pages 00–00.
- Sawahata, L. (2001). *Color Harmony Workbook*. Rockport Publishers, Inc.
- Schnur, S., Bektaş, K., Salahi, M., and Çöltekin, A. (2010). A comparison of measured and perceived visual complexity for dynamic web maps. In *GIScience 2010 : sixth International Conference on Geographic Information Science, Zurich, Switzerland, 14 September 2010 - 17 September 2010*.
- Skupin, A. and Fabrikant, S. (2003). Spatialization Methods : a cartographic research agenda for non-geographic information visualization. *CaGIS*, 30(2) :95–115.
- Sukhoveeva, I. (2009). Sémiologie du changement appliquée à la cartographie des évolutions du bâti. Master's thesis, Université Paris 1.
- Sutter, D. (1858). *Philosophie des beaux-arts appliquée à la peinture*. Jules Tardieu, Paris.
- Sutton, T. and Whelan, B. M. (2004). *The Complete Color Harmony - Expert Color Information for Professional Color Results (Color Harmony)*. Rockport Publishers.
- Thollot, J. (2008). *Expressive rendering, tools and algorithms for a better visual communication*. Accreditation to supervise research, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG.
- Touya, G., Christophe, S., and Hoarau, C. (2015). Problématiques de recherche autour de la notion de clutter en cartographie automatique. *Cartes & Géomatique - Revue du Comité Français de Cartographie*, 226 :91–100.
- Touya, G., Christophe, S., and Hoarau, C. (2016). Clutter and map legibility in automated cartography : A research agenda. *Cartographica : The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 51(3).

- Trapp, M., Semmo, A., and Döllner, J. (2015). Interactive Rendering and Stylization of Transportation Networks Using Distance Fields. In *Proceedings of the 10th International Conference on Computer Graphics Theory and Applications (GRAPP 2015)*, pages 207–219.
- Treisman, A. (1992). *Introduction aux sciences cognitives*, chapter L’attention, les traits et la perception des objets, pages 153–191. Paris, Gallimard (Folios-Essais).
- Treisman, A. and Gelade, G. (1980). Feature-Integration Theory of attention. *Cognitive Psychology*, 12 :97–136.
- Vallauri, D., Grel, A., Granier, E., and Dupouey, J. (2012). Les forêts de cassini. analyse quantitative et comparaison avec les forêts actuelles. Technical report, Rapport WWF/INRA, Marseille.
- Vanderhaeghe, D. (2008). *Coherent distribution of primitives for animations’ stylisation and halftoning*. PhD thesis, Université Joseph-Fourier - Grenoble I.
- Vanderhaeghe, D. and Collomosse, J. (2013). Stroke Based Painterly Rendering. In Rosin, P. and Collomosse, J., editors, *Image and Video-Based Artistic Stylisation*, volume 42 of *Computational Imaging and Vision*, pages 3–21. Springer London.
- Vinasse, A. (2016). Conception et implémentation d’un modèle de style adapté à une application web 3d. Master’s thesis, Ecole Centrale de Nantes, option UrbaniSTIC.
- Ward, J. H. (1963). Hierarchical Grouping to optimize an objective function. *Journal of American Statistical Association*, 58(301) :236–244.
- Weger (1998). *Cartographie - Chapitre VIII - La sémiologie*. 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.
- Willats, J. and Durand, F. (2005). Defining Pictorial Style : Lessons From Linguistics and Computer Graphics. *Axiomathes*, 15(3).