HAL open science

Contribution à la gestion des données géographiques : Modélisation et interrogation par croquis

Moultazem Ghazal

To cite this version:

Moultazem Ghazal. Contribution à la gestion des données géographiques : Modélisation et interrogation par croquis. Modélisation et simulation. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2010. Français. NNT : . tel-00504944

HAL Id: tel-00504944

https://theses.hal.science/tel-00504944v1

Submitted on 22 Jul 2010

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.

THESE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE TOULOUSE
Délivré par l'UNIVERSITE DE TOULOUSE III – Paul SABATIER

Spécialité : **INFORMATIQUE**

Par

Moultazem Ghazal

Contribution à la gestion des données géographiques : Modélisation et interrogation par croquis

---

Soutenue le 2010, devant le jury composé de :

Mr Hervé Martin	Professeur à l'Université Grenoble 1	Rapporteur
Mme. Sylvie Calabretto	Maître de Conférences HDR à l'INSA Lyon	Rapporteur
Mme Florence Sèdes	Professeur à l'Université Toulouse III	Directrice de thèse

INSTITUT DE RECHERCHE EN INFORMATIQUE DE TOULOUSE
Université Paul Sabatier, 118 route de Narbonne, 31062 Toulouse cedex 04, Tel. 05.61.55.

Résumé

Les Systèmes d'Information Géographiques (SIG) réclament des besoins particuliers de gestion de leur contenu, parce qu'ils manipulent des données dont les structures sont complexes et hétérogènes. Ces données sont souvent difficiles à décrire par des requêtes classiques ou des prédicats basés sur des attributs. Le croquis à main levée (sketch) est une veille forme de présentation qui a été employée pour visualiser, échanger et enregistrer l'information graphique. Il semble être ainsi facilement adaptable pour présenter et interroger d'une manière flexible les données des SIG

Dans cette thèse nous cherchons à apporter une contribution à la gestion de données géographiques. Deux axes de recherche complémentaires ont formé l'épine dorsale de cette contribution :

- la proposition d'un modèle qui permet de représenter tout les aspects spécifiques des représentations géographiques. Cette modélisation a été conçue afin de permettre de détecter des ressemblances entre une requête esquissée et une configuration spatiale particulière. La notion de graphes a été largement utilisée pour représenter ces configurations d'une manière exhaustive. Notre approche cherche à simplifer ces présentations tout en gardant leur expressivité ;
- la mise en place d'un algorithme pour assurer la recherche des correspondants, dans une base de données géographique, d'une requête formulée sous forme d'un croquis. Cet algorithme est constitué par deux étapes : l'appariement et le calcul de similarité. La complexité des méthodes d'appariement existantes nous a menés à proposer une solution qui consiste à regrouper les objets en se basant sur la proximité spatiale.

Nos travaux ont donné lieu à la réalisation d'un prototype « SIG-Croquis ». Il s'agit d'un système d'aide à la construction des croquis. Ces croquis seront utilisés par la suite pour interroger une base d'images géographiques. Les requêtes ainsi que les données de notre base de test ont été modélisées, simplifiées et appariées en utilisant l'ensemble des approches proposées dans cette thèse.

Mots clés : base de données géographiques, croquis, couches de représentations des données géographiques, modélisation, simplification des graphes, graphe de voisinage spatial, appariement des graphes.

Remerciements

Je tiens à remercier très sincèrement Messieurs Claude Chrisment et Gilles Zurfluh, responsables de l'équipe « Systèmes d'Informations Généralisées (SIG) », pour m'avoir accueilli au sein de leur équipe afin de mener à bien cette étude.

Mes plus vifs remerciements s'adressent à Florence Sèdes professeur à l'Université Toulouse III sans qui cette thèse ne serait pas ce qu'elle est. Je la remercie pour m'avoir montré ce qu'était le monde de la recherche et pour les nombreuses collaborations qu'elle a apportées. Elle s'y est grandement impliquée par ses directives, ses remarques et suggestions. Je tiens à la remercier aussi pour la liberté qu'elle m'a laissée dans la conduite de ma recherche.

Mes remerciements les plus respectueux vont à Monsieur Hervé Martin, professeur à l'université de Grenoble 1 et Madame Sylvie Calabretto, maître de conférences HDR à l'INSA de Lyon qui m'ont fait l'honneur d'évaluer cette thèse et d'en être rapporteurs. Je les remercie pour leurs conseils et leurs suggestions qui ont permis l'amélioration de ce manuscrit.

Mes remerciements vont également aux examinateurs pour avoir accepté d'examiner mes travaux de recherche. Je les remercie pour l'honneur qu'ils me font en participant à mon jury.

Je voudrais rendre hommage à mes professeurs qui ont contribué à ma formation de loin ou de près, en France ou en Syrie.

Je souhaite évidemment remercier les différentes personnes de l'équipe SIG pour leur soutien scientifique mais aussi et surtout pour avoir réussi à créer une super ambiance au sein et en dehors du labo. Toute ma reconnaissance à mes collègues du bureau et à Imade Tahi, Christelle Tahi, Djemal Karim, Anis Jedidi, Yamen Bouaziz, Abdeslame Alilaouar et Ronan Tournier pour leurs conseils et leurs aides quotidiennes. Je n'oublie pas de remercier Mohamed Mbarki et Guillaume Cabanac pour leur aide précieuse dans la relecture avertie et la correction de ma thèse. Je leur exprime ma très profonde gratitude.

Je ne manquerai pas de dire un grand merci à ma belle famille pour son aide et son soutien. Qu'elle trouve avec ceci un modeste geste de reconnaissance et de remerciement.

Merci à mes parents qui m'ont beaucoup appris, qui m'ont toujours encouragé et rêvé de me voir docteur. Merci aussi à mes frères et à mes sœurs d'être toujours à mes côtés et qui par leurs présences et leurs amours ont donné du goût et un sens à ma vie.

Enfin, je tiens à remercier ma femme Nuha à qui je dédie cette thèse, pour son soutien constant et sa présence. Merci pour ton courage, ton appui sans limite, ta persévérance et ta compréhension.

Merci à toutes les personnes que je n'ai pas citées ici et qui se reconnaîtront dans ces quelques lignes.

Sommaire

Introduction générale 1

1. Systèmes d'Information Géographique (SIG) 5
2. Interaction avec les SIG 6
3. Problématiques 7
4. Contributions 8
5. Organisation du mémoire 9

Partie 1 : État de l'art et contexte de l'étude 11

Chapitre I : Interrogation des données géographiques : Vers l'utilisation des croquis 13

I. 1. Introduction 17

I. 2. SIG 17

I. 2. 1. Données géographiques 18

I. 2. 2. Modes de représentation 18

I. 3. Interaction avec les SIG 19

I. 3. 1. Étude de l'adéquation des modalités d'utilisation d'un SIG 20

I. 3. 2. L'intérêt d'utiliser les croquis dans l'interrogation spatiale 21

I. 4. Interfaces utilisateur basées sur le croquis 23

Synthèse 28

I. 5. Étude analytique des comportements d'utilisateurs 28

I. 5. 1. Objets dessinés 29

I. 5. 2. Relations spatiales 29

I. 5. 3. Annotation 30

I. 6. Conclusion 31

Chapitre II : Comparaison des croquis : État de l'art sur les méthodes d'appariement de graphes 33

II. 1. Introduction 37

II. 2. Concepts et termes de base 37

II. 3. Représentation des données spatiales par graphes 38

II. 4. Définition et classification des méthodes d'appariement entre graphes 39

II. 4. 1. Appariement exact 39

II. 4. 2. Appariement inexact 43

II. 5. Conclusion 48

Partie 2 : Gestion des données géographiques : Propositions des modèles et un prototype d'interrogation par croquis 37

Chapitre III : Notre proposition : Vers la numérisation des croquis 51

III. 1. Introduction 55

III. 1. 1. Modèle générique de configuration spatiale 55

III. 1. 2. Utilisation du graphe pour instancier ce modèle 56

III. 1. 3. Discussion sur le type de graphe optimal pour représenter une configuration spatiale 57

III. 2. Méthodes de simplification du graphe 58

III. 2. 1. Minimisation du nombre de relations en utilisant la sémantique 58

III. 2. 2. Minimisation du nombre de relations en utilisant le contexte spatial 59

III. 2. 3. Discussion sur les méthodes de simplification du graphe 59

III. 3. Modèle de données géographiques 60

III. 3. 1. Modèle de réseau géographique 60

III. 3. 2. Modèle de couche de régions 65

III. 4. Méthodes d'appariement et mesures de similarité 72

III. 4. 1. Méthode d'appariement et mesures de similarité pour les réseaux géographiques 73

III. 4. 2. Méthode d'appariement et mesures de similarité pour les couches des régions 79

III. 4. 3. Mesures de similarité pour les requêtes multi-couches 85

III. 5. Conclusion 86

Chapitre IV : Validation : Proposition d'un outil d'interrogation par croquis 89

IV. 1. Introduction 93

IV. 2. Corpus de test 93

IV. 3. Prototype SIG-Croquis 96

IV. 3. 1. Architecture 96

IV. 3. 2. Exemples illustratifs 98

IV. 4. Évaluation 104
IV. 4. 1. Capacité à trouver les résultats retournés par l'approche classique 105
IV. 4. 2. Capacité à répondre aux requête à base de croquis 108
IV. 5. Conclusion 109
Conclusion générale 111
1. Bilan 115
2. Intérêt et originalité de notre approche 115
3. Limites et perspectives à nos travaux 117
Annexes 131
Annexe A : Modes de représentation 133
A. 1. Mode vectoriel (Vector) 133
A. 2. Mode matriciel (Raster) 134
Annexe B : Étude de l'adéquation des modalités d'utilisation d'un SIG 135
B. 1. Canaux de sortie de l'utilisateur 135
B. 2. Canaux d'entrée de l'utilisateur 137
B. 3. Bilan sur des modalités d'utilisateur 137
Table de figures 139
Table de Tableaux 141

Introduction générale

Introduction générale 1

1. Systèmes d'Information Géographique (SIG) 5
2. Interaction avec les SIG 6
3. Problématiques 7
4. Contributions 8
5. Organisation du mémoire 9

Les interfaces associées aux SIG (Systèmes d'Information Géographique) sont peu intuitives. Les outils disponibles pour interagir avec ces interfaces afin d'accéder à l'information spatiale sont assez complexes. De ce fait, cette information demeure difficilement hormis par des personnes ayant un niveau élevé de compétence et de connaissance du domaine.

Donner la possibilité aux utilisateurs d'interroger directement ces systèmes en donnant un aperçu du résultat souhaité semble être une piste prometteuse pour rendre les systèmes plus exploitables. Le croquis à main levée (sketch) est une forme de communication qui a depuis longtemps été utilisée pour visualiser, enregistrer, et échanger l'information. En dépit de son expressivité prouvée, elle n'est pas devenue une modalité d'interaction fréquemment utilisée dans les systèmes informatiques. Les SIG ont un besoin particulier de ces formes avancées d'interaction avec l'utilisateur ; ils traitent des données, qui ont généralement une structure complexe et hétérogène, souvent difficiles à décrire en utilisant les méthodes traditionnelles comme celles basées sur le texte, et manquent de pouvoir d'expressivité pour les critères spécifiques spatiaux ou temporels.

Les SIG traditionnels permettent à l'utilisateur d'accéder à l'information en utilisant la méthode classique d'interrogation des bases de données (exact match). Ce type d'accès est rapide et efficace, mais il limite leur utilisation. Pour répondre à la croissante demande liée aux données géographiques, un renforcement de l'accès à l'information en utilisant une méthode plus orientée « recherche d'information » permettrait de fournir des systèmes d'interrogation plus flexibles en se basant sur des recherches approchées, non exactes.

L'objectif de cette thèse est d'étudier l'apport des croquis dans le processus de recherche d'information spatiale et d'élaborer des méthodes et un modèle efficace pour les utiliser dans l'interrogation d'une base de données spatiale. Dans ce cadre, nous nous basons sur les comportements des utilisateurs, quand ils dessinent leurs croquis, pour développer une représentation compacte pour les données spatiales et les requêtes. Un prototype logiciel d'un système d'interrogation par croquis est mis en œuvre pour vérifier les concepts et les théories développés.

Pour présenter le cadre d'étude de nos travaux, nous définissons dans la suite de cette introduction les Systèmes d'Information Géographique. Nous présenterons ensuite le principal axe de recherche mené dans cette thèse, à savoir les interactions avec les SIG afin d'améliorer l'accessibilité à l'information stockée dans ces systèmes.

1. Systèmes d'Information Géographique (SIG)

Les données sont les simples faits, elles ne sont pas utilisables si elles sont exploitées séparément les unes des autres. Mais lorsque ces données sont traitées, organisées,

structurées ou présentées dans un contexte donné, elles deviennent utiles : elles sont appelées « information ». L'information spatiale ajoute une référence ou un composant spatial à cette notion. Au cours des deux dernières décennies, l'information spatiale est devenue de plus en plus importante. Les gens se sont rendu compte qu'il est souvent plus approprié de présenter l'information dans l'espace que sous des formes abstraites. Cette tendance a favorisé le développement des systèmes qui permettent aux utilisateurs de saisir, vérifier, intégrer, manipuler, analyser et afficher l'information spatiale. Les systèmes dotés de telles capacités sont désignés sous le terme de « Systèmes d'Information Géographique » (SIG) [Goodchild et al. 1987] [Laurini et al. 1992].

Les premiers SIG ont été utilisés pour créer des cartes, des présentations démographiques ou d'autres présentations géo-indexées. Les SIG sont devenus par la suite beaucoup plus variés et ont réussi à pénétrer des domaines inconnus précédemment [Coppock et al. 1991]. Cette diversité a aussi changé la communauté de leurs utilisateurs. Les utilisateurs de SIG appartenaient à une petite élite d'experts. L'élargissement de champs d'application a créé le besoin de s'adapter à un grand spectre de compétences, s'étendant des utilisateurs débutants aux professionnels. Il est donc devenu crucial que les SIG fournissent des moyens appropriés d'interaction permettant aux utilisateurs d'accéder à l'information dont ils ont besoin.

2. Interaction avec les SIG

Les améliorations des IHM (Interaction Homme-Machine) ont mené à une grande convivialité et à une large acceptation de l'ordinateur dans notre vie quotidienne. La nouvelle génération simplifie la manière dont les gens interagissent avec l'ordinateur et ouvre la voie à des dispositifs intelligents et mobiles qui changent la relation à l'ordinateur.

Les méthodes employées pour interagir avec les ordinateurs sont désignées par l'expression « modalités d'utilisateur » : la vision, l'audition et les différents modes d'expression tels que l'écriture, la parole et les gestes. L'utilisation de plusieurs modalités augmente la flexibilité et la fiabilité d'une interface, qui s'adapte aux préférences, au niveau d'expérience et à la tâche à accomplir [Oviatt 1999].

L'interaction de l'utilisateur dans les SIG n'est pas différente des autres domaines d'application. La plupart des tâches sont exécutées via des menus déroulants ou des boutons prédéfinis dans des boîtes de dialogue. Malheureusement, ce genre d'interaction n'est pas intuitive et peut devenir encombrante [Egenhofer 1990]. L'intégration des nouvelles modalités dans les interfaces des SIG semble être une approche prometteuse pour améliorer cette situation.

Comme alternative aux interactions précédemment citées, le croquis à main levée est une modalité bien adaptée pour décrire les scènes spatiales [Oviatt 1997]. L'utilisation de

cette modalité dans les interfaces de SIG a un intérêt particulier, notamment dans les applications où l'information spatiale doit être retrouvée. La plupart des méthodes utilisées pour l'interrogation se basant sur l'utilisation des textes pour formuler les requêtes, les langages d'interrogations textuels étant eux même non spatiaux, il est souvent difficile et non intuitif de formuler une requête spatiale en utilisant ces langages [Egenhofer 1992]. En revanche, le croquis est une forme visuelle d'expression [Goldschmidt 1991]. Les objets dans le croquis sont représentés en deux dimensions et les caractéristiques spatiales peuvent être facilement extraites. Les attributs non spatiaux peuvent être assignés aux objets par des annotations écrites. La structure logique de la requête est implicitement donnée par l'arrangement des objets dans le croquis. Un croquis reflète une scène spatiale d'une manière plus objective que n'importe quel langage textuel. Par conséquent, le croquis est moins sensible aux erreurs d'interprétation et ambiguïtés.

Outre les considérations intéressantes sur l'interrogation par croquis, cette modalité pose de grands défis qui doivent être résolus afin d'assurer son utilisation optimale. Nous détaillons dans la section suivante les problématiques majeures abordées dans cette thèse.

3. Problématiques

Cette thèse a pour objectif de démontrer l'utilité des croquis à main levée dans l'interrogation de bases de données spatiales. Dans ce contexte nous voulons prouver la pertinence du croquis en tant que modalité intuitive et expressive pour formuler les requêtes.

Confronté à une « scène », l'homme peut retrouver facilement les configurations spatiales similaires à ce croquis. Il utilise une approche sélective qui lui permet de se concentrer sur les détails pertinents. Toutes les comparaisons impossibles sont directement omises. Par contre l'ordinateur est programmé pour faire toutes les comparaisons possibles.

Notre recherche se concentre sur les bases de données spatiales qui stockent l'information sous forme d'objets ainsi que les relations spatiales entre ces objets. Le nombre de relations dans une configuration spatiale devient assez important lorsqu'elle couvre une grande surface. Puisque le nombre de relations augmente de façon quadratique en fonction du nombre d'objets $O(n^2)$, il est donc indésirable de prendre en compte toutes ces relations. Par conséquent, trouver une méthode qui permet de réduire le nombre de relations sans diminuer l'expressivité du modèle est un fondement important pour construire un système d'interrogation par croquis.

De telles relations concernent les informations stockées dans les BD spatiales. Par analogie, les relations extraites du croquis ne doivent pas être retrouvées dans leur intégralité dans la BD (pas d'appariement exact). En effet, un utilisateur nomade (non

expert) ne définit pas ses besoins d'une manière précise mais plutôt à partir des éléments saillants qui guident sa recherche. Ainsi, l'utilisation des méthodes traditionnelles d'interrogation (largement appliquées dans les SIG actuels) n'est pas adéquate pour accéder à l'information.

4. Contributions

Le croquis à main levée est une modalité appropriée pour décrire l'information spatiale, notamment pour la formulation des requêtes. Notre contribution consiste à accroître l'efficacité d'un système de recherche en réduisant au minimum le nombre de comparaisons, tout en maintenant la qualité du résultat.

L'idée est de structurer en premier lieu le croquis sous forme d'un graphe de relations, puis de trouver un sous-ensemble représentatif de relations spatiales. Ce sous-ensemble permettra à lui seul de trouver des résultats comparables à ceux retrouvées si toutes les relations sont prises en compte.

Cette thèse vise à présenter notre proposition permettant de contribuer à un système de recherche d'information spatiale par croquis. Les investigations doivent être faites dans plusieurs domaines : d'abord, il faut prouver que le croquis est une modalité d'interaction alternative prometteuse pour les SIG. Ensuite, une étude et une évaluation des systèmes de recherche utilisant les croquis montrent les approches utilisées pour retrouver l'information et les améliorations qui peuvent être apportées. Ces deux étapes sont essentielles pour prouver l'apport et la faisabilité de notre proposition.

Un croquis est une forme individuelle d'expression qui spécifie les besoins d'un utilisateur. Afin de découvrir comment les utilisateurs conçoivent leurs croquis, et comment l'information spatiale y est représentée, nous nous basons sur une analyse des différentes habitudes pendant la construction des croquis. Cette étude nous aide à traduire les croquis sous une forme numérique qui peut être traitée par l'ordinateur. Le graphe est une structure adéquate pour représenter ce type d'information. Il peut contenir tous les aspects représentés par les croquis et permet de prendre en compte les relations spatiales entre les composants (les objets dessinés).

L'étape de comparaison est une étape cruciale dans les systèmes de recherche d'information. Tout comme pour l'appariement de requête, il existe deux approches pour comparer des graphes : l'appariement exact et approximatif. Nous présentons ces deux catégories en faisant un tour d'horizon des méthodes les plus utilisées afin d'inspirer une nouvelle approche adaptée à notre domaine de recherche.

Afin d'améliorer l'efficacité de la représentation du croquis, nous étudions les méthodes de simplification de graphe. L'ultime phase consiste à proposer une validation de la théorie par un prototype et une étude de son utilisation. À cette fin, nous mettons en

place un système de recherche d'information géographique basé sur le croquis. Ce système permet à un utilisateur de formuler sa requête en dessinant un croquis contrairement aux systèmes courants et grands public qui exigent une formulation sous forme de mots-clés.

5. Organisation du mémoire

Ce mémoire est décomposé en deux parties chacune comprenant deux chapitres. La première partie introduit et décrit tout le contexte de nos travaux et constitue un état de l'art des domaines abordés dans le cadre de notre thèse. La seconde partie présente nos principales contributions et décrit le cadre de leur validation.

Le premier chapitre traite le renforcement de l'accès à l'information spatiale en utilisant le croquis. Nous commençons ce chapitre par présenter les concepts de base pour les données géographiques. Nous montrons ensuite l'utilité d'utiliser le croquis pour transmettre un message spatial, à travers une étude de l'adéquation de différentes modalités d'interaction avec les SIG. Nous présentons un panorama des systèmes qui utilisent le croquis en particulier dans l'interrogation. Enfin et pour comprendre comment l'utilisateur présente l'information en utilisant cette modalité, la dernière section de ce chapitre est consacrée à une analyse des différentes habitudes des utilisateurs dans la construction du croquis.

Le deuxième chapitre aborde la traduction de croquis en une forme exploitable par l'ordinateur. Dans ce cadre, nous introduisons le graphe comme une structure bien adaptée pour représenter l'information spatiale et notamment l'organisation des objets qui composent un croquis. Une fois le croquis pris en compte par un système informatique, il sera intéressant de pouvoir utiliser sa présentation pour trouver des configurations similaires dans une base d'image géographiques. Afin de concevoir un tel système d'interrogation, il est nécessaire de dresser un état de l'art des méthodes utilisées pour comparer les structures représentées par des graphes à la fin du chapitre.

Le troisième chapitre est dédié à la présentation de nos travaux concernant la modélisation et la simplification de la représentation des données spatiales. Pour gérer la complexité des configurations spatiales, nous proposons de regrouper les objets géographiques en fonction de leur type et leur taille. Ce regroupement nous permet de composer la configuration en plusieurs couches. Nous serons alors en mesure de proposer à l'utilisateur de faire des requêtes mono et/ou multi-couches.

Le quatrième chapitre présente le cadre applicatif qui a été choisi, les développements réalisés ainsi que les validations effectuées. Dans un premier temps, nous décrivons les données qui nous ont servi de base de test. Nous détaillons ensuite l'architecture de notre outil d'interrogation par croquis « SIG-Croquis » qui a été

développé. Dans la dernière partie de ce chapitre nous nous penchons sur la présentation de quelques exemples illustratifs de l'utilisation de cet outil ainsi qu'un bilan d'évaluation des performances de notre approche.

Nous concluons ce mémoire en rappelant nos contributions, les apports et l'originalité de notre travail, en précisant ses limites et les perspectives de recherche envisageables

Partie 1 :
État de l'art et contexte de l'étude

Chapitre I :
Interrogation des données géographiques :
Vers l'utilisation des croquis

Chapitre I : Interrogation des données géographiques : Vers l'utilisation des croquis 13

I. 1. Introduction 17

I. 2 SIG 17

I. 2. 1. Données géographiques 18

I. 2. 2. Modes de représentation 18

I. 3 Interaction avec les SIG 19

I. 3. 1. Étude de l'adéquation des modalités d'utilisation d'un SIG 20

I. 3. 1. 1. Dessin (Croquis) 20

I. 3. 1. 2. Vue 20

I. 3. 1. 3. Bilan sur des modalités d'utilisateur 21

I. 3. 2. L'intérêt d'utiliser les croquis dans l'interrogation spatiale 21

I. 4. Interfaces utilisateur basées sur le croquis 23

Synthèse 28

I. 5. Étude analytique des comportements d'utilisateurs 28

I. 5. 1. Objets dessinés 29

I. 5. 2. Relations spatiales 29

I. 5. 3. Annotation 30

I. 6. Conclusion 31

I. 1. Introduction

Nous commençons ce chapitre par présenter un ensemble de concepts qui nous paraissent importants afin de trouver des pistes qui peuvent nous permettre de comprendre ce que signifient les données géographiques.

Ensuite, et afin d'atteindre notre objectif d'améliorer l'interaction avec les SIG, nous présentons dans la troisième section les différentes méthodes de communication en mettant l'accent sur leur adéquation avec les données géographiques. Cette présentation nous permet d'identifier la méthode la plus adéquate pour « transmettre un message spatial ». Nous consacrons la deuxième partie de cette section à la présentation de l'intérêt d'utiliser cette modalité par rapport à la modalité textuelle traditionnelle.

Un tour d'horizon des systèmes qui utilisent cette modalité, en particulier dans l'interrogation, sera présenté dans la quatrième section.

Nous finissons ce chapitre par une analyse des différents usages des utilisateurs dans l'utilisation de cette modalité. Cette étude nous permet de comprendre comment l'information spatiale y est représentée par cette méthode d'interaction et comment la traduire dans une forme numérique qui peut être traitée par l'ordinateur.

I. 2. SIG

Les SIG sont des logiciels qui utilisent la capacité des ordinateurs dans le domaine du stockage, de l'analyse et de la représentation des données qui sont associées à la distribution géographique. Une des définitions largement utilisées pour décrire les SIG est celle fournie par le centre américain d'information géographique et d'analyse [Goodchild et al. 1990] :

« Un SIG est un ensemble de matériels, de logiciels et de procédures conçus pour permettre la collecte, la gestion, la manipulation, l'analyse, la modélisation, l'affichage de données à référence spatiale afin de résoudre des problèmes complexes d'aménagement et de gestion »

Dans la suite, nous présentons un ensemble de concepts qui sont importants pour appréhender le monde des bases de données géographiques. En effet, ces données ont des spécificités qui doivent être explicitées.

I. 2. 1. Données géographiques

Les données géographiques, comme toutes données informatiques, regroupent des données thématiques (nom, identifiant, etc.), mais également des données spatiales (localisation, relations spatiales, etc.). Les SIG stockent généralement ces données sous la forme de couches thématiques pouvant être reliées les unes aux autres par la géographie. La figure I. 1 montre une représentation d'un site géographique au travers d'un ensemble de couches thématiques. Chaque couche est une carte montrant la répartition spatiale d'une entité géographique ou d'un phénomène. L'utilisation des couches pour la représentation est une approche simple mais extrêmement puissante. Elle permet de gérer (en décrivant l'organisation de ces différents composants) la complexité du monde réel, ce qui aide à comprendre les relations entre les différents thèmes.

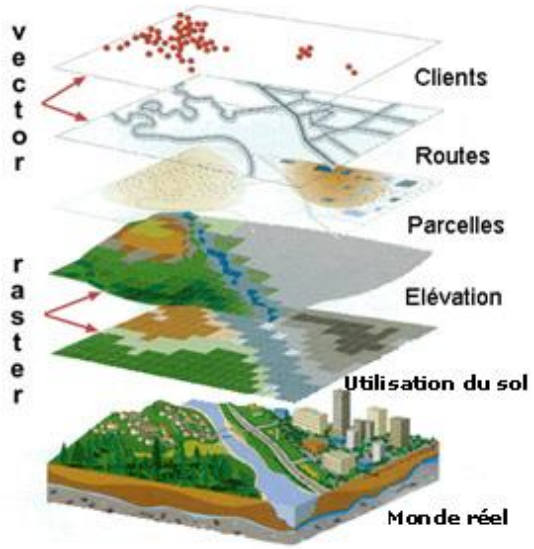


Figure I. 1. Représentation d'un site géographique à travers un ensemble de couches thématiques

Dans chaque couche, les données sont représentées selon soit les modes vectoriel ou matriciel (raster).

I. 2. 2. Modes de représentation

La perception de l'information géographique est double. Elle peut être discrète ou continue. La vue discrète permet généralement de décrire les objets géographiques ayant un contour bien délimité, alors que la vue continue se prête plus à la description de phénomènes dont la limite est parfois mal définie.

De ces deux vues de l'espace découlent deux modes de représentation (en anglais « vector » et « raster »). Ces deux modes présentent de grandes différences, en ce qui concerne leurs caractéristiques. Malgré cela, beaucoup de SIG disposent d'algorithmes de conversion d'un mode à l'autre [Demers 1997]. Une présentation de ces deux modes se retrouve dans l'annexe A.

Ces deux modes de représentation sont complémentaires. Une même information localisée à une position géographique pourrait être traduite dans les deux modes. Ses différentes représentations se superposent, laissant à l'utilisateur le soin de choisir en fonction de son usage la représentation qui lui convient le mieux.

Malgré l'importance et la quantité des données géographiques qui sont représentées selon le mode matriciel, nous nous intéressons dans notre recherche aux données représentées selon le mode vectoriel. La raison de ce choix est liée au fait que nous cherchons à faciliter l'accès à l'information pour des utilisateurs non experts. Le raisonnement de ces derniers assimile plus facilement la représentation vectorielle, plus proche de la réalité puisqu'elle se base sur une projection directe du monde réel sur la carte, que la représentation matricielle, plus adéquate aux personnes familiarisées aux concepts de SIG puisqu'elle nécessite des capacités d'interprétations spécifiques des paramètres techniques tels que la couleur.

Par ailleurs, l'accès à l'information doit généralement être simple, rapide et efficace [Lewis 1995], ce qui exige une adaptation de l'interface utilisateur pour ce type de données. Par conséquent, la recherche dans l'interaction entre l'homme et la machine est cruciale dans ce contexte. Dans la section suivante nous présentons un état de l'art de l'interaction avec les SIG, et la possibilité d'améliorer celle-ci afin de permettre à l'utilisateur d'atteindre facilement l'information nécessaire.

I. 3. Interaction avec les SIG

Le dialogue entre l'utilisateur et l'ordinateur est réalisé par l'intermédiaire d'une interface qui gère l'aller-retour de l'information entre le monde mental du premier et le monde technique du second [Knob 2005].

Les méthodes d'interaction avec les SIG ne diffèrent pas de celles qui sont utilisées dans d'autres domaines. Tandis que ces méthodes sont adaptées à la plupart des applications, telles que le traitement de texte et d'autres applications bureautiques, elles sont souvent vues comme des opérations fastidieuses dans les SIG [Egenhofer et al. 1993]. Les utilisateurs dépensent beaucoup d'efforts pour interagir avec ces applications, puisque les principes fondamentaux sur lesquels les SIG ont été conçus ne sont pas à l'origine spatiaux [Blaser et al. 2000]. Cela rend leurs interfaces très spécialisées et complique leurs modes d'interaction qui nécessitent des compétences particulières. Cette situation est devenue inacceptable et nécessite une solution pertinente pour plusieurs raisons.

Les données spatiales sont de plus en plus employées dans une variété de nouveaux domaines, telles que la biologie ou la géolocalisation. Dans ces domaines, les utilisateurs sont souvent peu familiarisés avec les concepts de SIG. Cette diversification conduit à des

nouveaux besoins pour des utilisateurs de différents milieux professionnels. Si une interface est très spécialisée, la probabilité est élevée que peu de personnes soient en mesure de l'utiliser, sans la nécessite d'apprendre le mode d'utilisation spécifique de ce système. Par conséquent, les applications de SIG bénéficieront particulièrement du développement d'une interface plus simple et plus puissante qui permet aux utilisateurs de choisir le type d'interaction en fonction de leur connaissance et de leur préférence.

Par ailleurs, les tendances à la miniaturisation des dispositifs de calcul, de mobilité, et d'intégration de « l'intelligence » se poursuivront à l'avenir. La recherche dans le domaine des IHM évolue car il est impossible d'interagir avec tous ces dispositifs avec un clavier et une souris (par exemple le GPS d'une voiture) [Weiser 1998]. L'utilisation croissante de ces appareils exige que leurs interfaces soient plus simples et plus intuitives, de sorte qu'elles puissent être exploitées par des personnes ayant différents niveaux de compétences. Les utilisateurs devraient pouvoir librement choisir et changer leur manière d'interaction en fonction de leurs capacités et leurs situations.

Dans la section suivante, nous présentons les différentes méthodes d'interaction, en mettant l'accent sur leur adaptation avec les systèmes de recherche d'information spatiale.

I. 3. 1. Étude de l'adéquation des modalités d'utilisation d'un SIG

Les modalités comprennent tout type de sensation, y compris la vision et l'audition, et les différents modes d'expression tels que l'écriture, la parole ou les gestes que les gens utilisent pour communiquer entre eux [Wexelblat 1995]. Dans la suite, nous mettons l'accent sur les deux modalités les plus adéquates qui permettent à un utilisateur d'émettre et recevoir l'information spatiale. Une présentation plus détaillé qui couvre toutes les modalités possibles se trouve dans l'annexe B.

I. 3. 1. 1. Dessin (Croquis)

Le croquis à main levée est une forme visuelle d'expression et une modalité universellement comprise. Bien que le dessin soit dépendant des outils externes (crayon, stylo, pinceau), il est adapté pour décrire des configurations spatiales complexes. Une autre caractéristique importante des dessins est qu'ils transmettent implicitement une quantité importante d'information. Pour toutes ces raisons, le croquis à main levée est une modalité d'interaction bien adaptée pour décrire les configurations spatiales.

I. 3. 1. 2. Vue

La quantité de données qui peuvent être extraites d'une image en un clin d'œil est assez importante. C'est sans doute une des raisons qui conduit notre société à être de plus en plus visuelle [Buxton 1986]. La perception optique permet de suivre plusieurs objets en même temps par balayage rapide de la portée visuelle.

La représentation visuelle est la principale modalité utilisée par l'ordinateur pour communiquer l'information à l'utilisateur. Par le biais de cette modalité, l'utilisateur peut suivre et contrôler des processus, lire les messages, suivre le curseur ou d'autres objets visuels, etc. Elle présente ainsi la modalité de réception la plus adéquate pour visualiser une configuration spatiale.

I. 3. 1. 3. Bilan sur des modalités d'utilisateur

L'interaction entre l'utilisateur et l'ordinateur est assez limitée par rapport à la richesse de formes de la communication entre les êtres humains. La plupart des systèmes informatiques ne permettent aux utilisateurs que de pointer par la souris ou de taper du texte pour exprimer leurs intentions ou leurs problèmes. Bien que beaucoup d'utilisateurs aient accepté cette situation, ils sont souvent insatisfaits.

Afin de trouver une solution à cette insatisfaction pour les systèmes de recherche d'information spatiale, nous avons présenté les modalités d'interaction et étudié leur capacité à décrire ce type d'information. Nous avons justifié le fait que le croquis est une modalité universellement comprise et bien adaptée pour décrire les scènes spatiales. De plus sa capacité à transmettre implicitement une quantité importante d'information aide à diminuer l'effort de l'utilisateur pour exprimer ses besoins.

Par conséquent, permettre à l'utilisateur de griffonner un croquis afin d'exprimer ses besoins d'information peut être une solution à cette insatisfaction dans ces systèmes. Dans la section suivante nous présentons les intérêts d'utiliser les croquis dans l'interrogation spatiale et les différents types de requêtes qui peuvent s'exprimer par cette modalité.

I. 3. 2. L'intérêt d'utiliser les croquis dans l'interrogation spatiale

Un utilisateur doit avoir une première idée de ce qu'il recherche, afin de pouvoir formuler sa question. Contrairement à des « questions » ordinaires (entre humains), les requêtes de bases de données doivent être exprimées dans des langages bien définis. Ces derniers ont des syntaxes fixes, ce qui les rend incompatibles avec le modèle mental d'interrogation de l'être humain. Le fossé entre ces deux modèles est élargi lorsque des composantes spatiales sont introduites dans les questions. Afin de combler cet espace, il faut trouver une autre méthode d'interrogation qui se rapproche de la manière dont les gens pensent.

L'intégration du croquis dans l'interface d'interrogation de SIG est une excellente proposition à cette fin. En effet, l'utilisation de dessins est la meilleure façon de décrire une configuration spatiale ciblée. L'intégration du croquis permet de couvrir tout le spectre d'interrogation spatiale, parce que l'utilisateur a la possibilité de choisir la modalité (soit verbale soit par croquis) qui lui convient pour exprimer sa question. Les expressions

verbales sont utilisées pour décrire des attributs non spatiaux tels que les noms ou les fonctionnalités, alors que le croquis est approprié lorsque l'idée initiale est « orientée » spatiale dans le modèle mental de l'utilisateur.

En fait, il y a trois principales motivations pour qu'un utilisateur dessine sa requête, ce qui conduit aux catégories suivantes, qui diffèrent essentiellement par le nombre de résultats attendus par l'utilisateur.

Requête	Nombre de résultats prévus
Où est-il ?	1
Existe-t-il ?	0 – n
En existe-t-il un similaire?	1 – n

Tableau I. 1. Trois catégories de requêtes qui peuvent être définies en utilisant le croquis

L'intérêt principal de la requête « où est-il ? » est de trouver la localisation spatiale d'un croquis. Par exemple, rechercher l'emplacement d'un bureau de poste particulier dont on est sûr de l'existence (avec un contexte précis : face à une station de métro, à côté d'un jardin, etc.) sur la carte d'une ville. Dans ce cas, l'utilisateur s'attend à un seul résultat. En complément, il est bien possible que le système rende plusieurs configurations similaires à son croquis.

La requête « Existe-t-il ? » est en général moins concrète que « Où est-il ? », parce que l'existence d'un résultat est incertaine. Donc le nombre de réponses prévues dans cette catégorie de requête est entre 0 et n. Par exemple, la recherche d'un emplacement approprié pour la construction d'un site de recyclage de déchets pourrait être réalisée par une interrogation par croquis (à coté d'une rivière, pas proches des maisons, etc.). Une telle requête pourrait prendre tous les règlements et les exigences environnementales en considération, y compris les aspects spatiaux et non spatiaux.

Dans la requête « En existe-t-il un similaire ? », l'utilisateur part d'une configuration qui existe déjà dans la base et cherche d'autres configurations similaires. Par exemple, copier un extrait d'un réseau routier spécifique (entrée d'autoroute, un certain nombre de rond-points, etc.) qui souffre d'un problème de débit de circulation et chercher des configurations similaires dans d'autres villes. Cela permettra de s'inspirer des systèmes de gestion de circulation (feux, ajout d'un pont, etc.) qui peuvent être mis en place pour résoudre ce problème de débit.

Dans la section suivante, nous présenterons les interfaces dans lesquelles les croquis ont été utilisés. Nous mettrons l'accent plus particulièrement sur leur utilisation dans les systèmes de recherche d'information.

I. 4. Interfaces utilisateur basées sur le croquis

Dans les systèmes informatiques, les croquis à main levée sont généralement utilisés soit dans l'étape de conception soit dans les systèmes de recherche d'information. Dans le premier cas, chaque objet dessiné doit être transformé en un symbole appartenant à un ensemble prédéfini. Ces applications sont très efficaces lorsque le nombre des symboles est limité. La conception des circuits électroniques [Gross 1996] ou d'une interface utilisateur [Landay et al. 2001] par croquis sont des bons exemples.

Dans les systèmes de recherche d'information, les croquis sont utilisés comme des requêtes pour interroger des bases d'images. Chaque croquis est une expression visuelle décrivant un seul objet recherché ou une configuration spatiale (qui regroupe plusieurs objets). Un tour d'horizon sur les systèmes les plus importants sera présenté dans ce qui suit.

À l'université de Munich Oettingenstr, en Allemagne, [Berchtold et al. 1997] a présenté un prototype d'un système de recherche d'information « S3 » pour une base de dessins industriels. Ce prototype supporte trois types d'interrogation : 1) par exemple en choisissant un dessin de la base, 2) par croquis en dessinant l'objet ou une partie de l'objet désiré, 3) par thématique en spécifiant certains attributs de l'objet. La figure I. 2 montre un exemple d'interrogation par croquis. La fenêtre gauche présente la requête de l'utilisateur, alors que la fenêtre droite présente les résultats obtenus pour ce croquis.

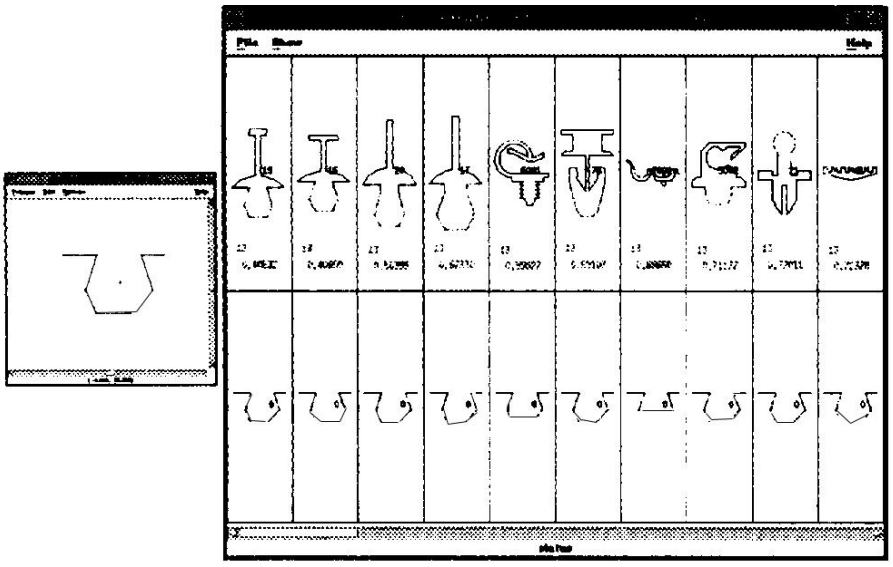


Figure I. 2. Exemple d'interrogation par croquis dans le système S3

Afin de rendre ce prototype indépendant d'un domaine précis, les auteurs ont proposé d'offrir à l'utilisateur un ensemble d'algorithmes de ressemblance. C'est l'utilisateur qui doit choisir l'algorithme qui conviendra le mieux à ses besoins. La

principale limitation de ce système réside dans le fait qu'il se base exclusivement sur le contour d'objet et ignore totalement les relations spatiales. Par conséquent, il n'est pas adapté pour la récupération des dessins qui contiennent plusieurs objets.

À l'université de Gerhard-Mercator, à Duisburg, en Allemagne, [Müller et al. 1999] a proposé une autre approche pour l'interrogation de dessins techniques d'ingénieures en se basant sur des modèles stochastiques. Les dessins dans la base et le croquis dessiné par l'utilisateur sont représentés en utilisant un modèle de Markov en pseudo 2D (pseudo-2D HMM) [Rabiner et al. 1986] renforcé avec le remplissage d'états [Young 1992]. Cela conduit à une approche intégrée qui assigne les scores de probabilité aux éléments de la base et détecte simultanément leurs modèles, ce qui diffère d'autres approches qui identifient d'abord les éléments de base (tels que lignes, points, etc.) et d'effectuer l'interprétation dans un deuxième temps.

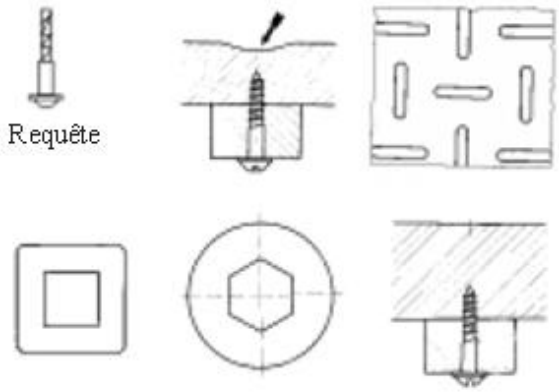


Figure I. 3. Requête dessinée par l'utilisateur et les dessins retournés par le système

La figure I. 3 montre le résultat obtenu par le système pour une requête dessinée. En fait, la méthode proposée est adéquate pour les dessins qui ne contiennent qu'un seul objet. Par conséquent, il ne peut pas traiter de croquis qui regroupent plusieurs objets.

À l'université de Kyungpoo, en Corée du Sud, [Park et al. 1999] a proposé une méthode pour des dessins 2D complexes (décrivant des pièces mécaniques) en se basant sur la décomposition récursive de contours en éléments dominants et auxiliaires. Cette décomposition est effectuée en fonction de l'association avec un ensemble de formes primitives. Les éléments obtenus avec les relations spatiales (l'inclusion et l'adjacence) sont représentés par le biais d'un graphe. Le petit ensemble de primitives utilisées pour la décomposition ainsi que la méthode d'appariement proposée rendent ce système peu efficace.

À l'université de Carnegie Melon, aux USA, [Leung et al. 2002] a proposé une méthode de récupération par croquis à partir d'une base de dessins. Elle est basée sur les formes des objets dessinés et les relations métriques entre eux. Les auteurs ont amélioré

leur méthode en prenant en compte les relations topologiques et en représentant les dessins par des graphes [Leung et al. 2003]. L'inconvénient majeur de cette approche concerne la restriction de ses formes de base (uniquement cercle, ligne et polygone).

À l'université d'état du Michigan, aux USA, [Namboodiri et al. 2004] a présenté un algorithme permettant de comparer deux croquis en se basant sur une représentation par des lignes. Les auteurs ont proposé de représenter le croquis par un ensemble de segments, afin de soumettre le problème d'identification des formes de base dans un croquis. Chaque croquis est divisé en utilisant les points du changement de direction. La figure I. 4 montre un croquis, les points repérés et sa représentation par un ensemble de lignes.

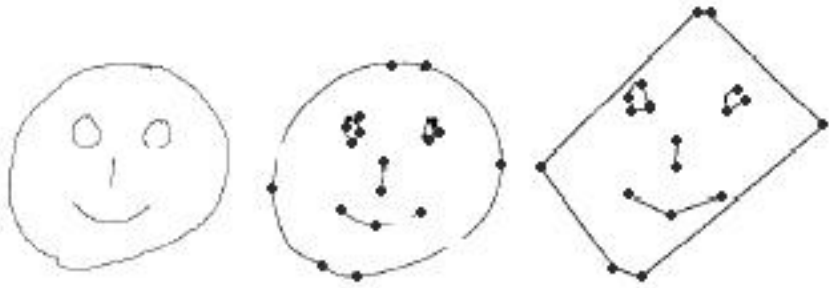


Figure I. 4. Représentation d'un croquis par un ensemble des lignes

Bien que l'algorithme soit simple à mettre en œuvre, il pose un problème lié à la conversion de croquis en ligne qui est très dépendante de la manière dont les utilisateurs dessinent leurs croquis.

À l'université d'Aquila, en Italie, [Mascio et al. 2004] a présenté un prototype de système de recherche d'information « CBIR Tuner» pour une base de dessins animés. Ce prototype supporte deux types d'interrogation : par exemple et par croquis. En effet, les dessins sont convertis en images matricielles et puis sont associés à des descripteurs d'éléments visuels invariants. Afin de rendre ce système indépendant d'un domaine précis, les auteurs ont proposé un ensemble varié de descripteurs et aussi un ensemble de mesures de similarité. L'interface du système permet à l'utilisateur de choisir les critères et les paramètres adéquats à son domaine d'application. La figure I. 5 montre l'interface de ce système.

Figure I. 5. Interface du système CBIR Tuner

En fonction de l'étude de la littérature, il apparaît que la conversion des dessins en images matricielles ne semble pas être une bonne idée, compte tenu du temps nécessaire et de la perte d'information.

À l'université de Purdue, aux USA, [Pu et al. 2006] a présenté deux méthodes pour calculer la similarité entre les croquis (la transformation harmonique sphérique 2.5D et l'histogramme de forme 2D). Ces méthodes sont invariantes par rapport à la rotation et au changement d'échelle. Les auteurs ont montré, par une évaluation expérimentale, que la combinaison de ces deux techniques offre de meilleurs résultats que chaque méthode séparement. Le non support de l'appariement partiel présente la principale limitation de cette méthode.

Dans la même université, [Hou et al. 2007] a présenté une méthode de récupération par croquis pour une base d'objets d'ingénierie 3D en se basant sur leurs vues 2D. La méthode combine les résultats obtenus par plusieurs classifieurs et intégre les « feedbacks » de l'utilisateur sur le résultat obtenu afin d'améliorer la performance du système.

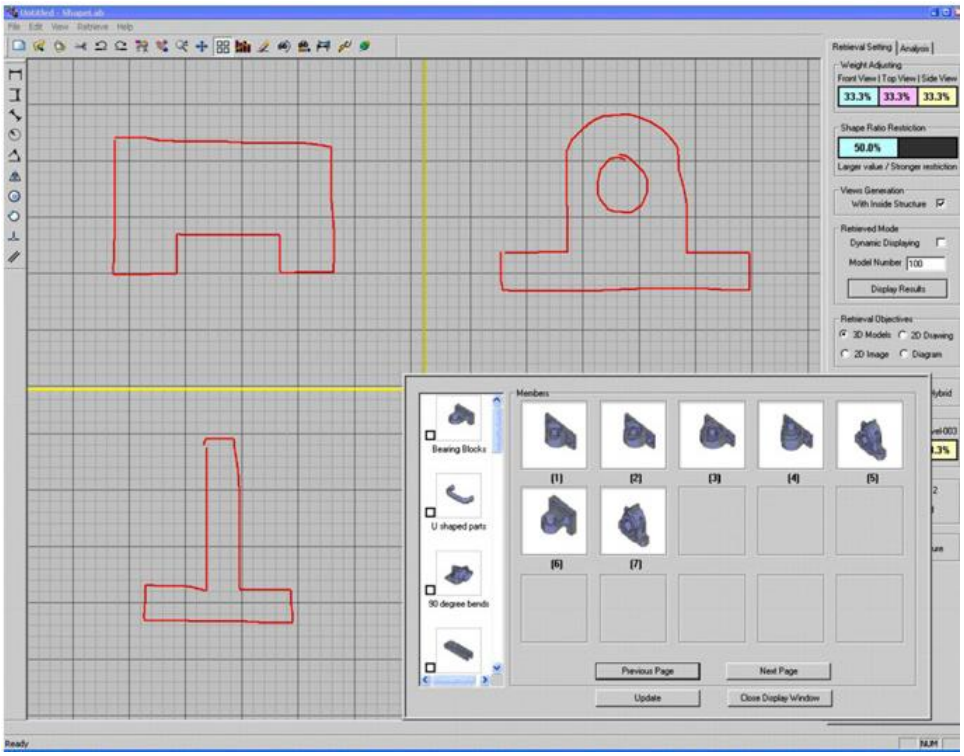


Figure I. 6. Objet 3D dessiné en se basant sur ses vues 2D et le résultat obtenu

La figure I. 6 montre comment l'utilisateur dessine un objet 3D en se basnt sur ses vues 2D et le résultat obtenu pour la requête dessinée. Bien que la solution possède une meilleure précision que l'utilisation des classifieurs individuels, la méthode proposée ne prend pas en compte l'appariement partiel.

Plus récemment, les mêmes auteurs ont présenté un autre approche [Hou et al. 2008]. Ils ont proposé de diviser la forme en deux niveaux ; un niveau supérieur pour la structure et un niveau inférieur pour la géométrie. En fait, le contour des dessins est extrait, puis segmenté en un ensemble de lignes droites. Chaque ligne est décrite par un point de son extrémité, sa longueur et son orientation. Cet ensemble de lignes décrit le niveau inférieur d'un dessin, la topologie définie par l'ensemble de points extraits décrit la niveau supérieur.

Au cours du processus d'appariement, la similitude entre deux structures indique la possibilité de la similarité entre les dessins sans pour autant confirmer tous les détails. Une

comparaison de géométrie mène à la confirmation de similarité. Le système a le même problème que le système précedent.

Synthèse

Outre les limitations spécifiques à chacun d'entre eux, ces systèmes partagent des inconvénients génériques majeurs. En fait, ils considèrent que le croquis est bien fait. Ils sont ainsi incapables de prendre en compte :

– l'inexactitude de l'information fournie pas l'utilisateur ;
– le manque dans sa description.

Ces éléments expliquent leur incapacité à trouver tous des résultats pertinents. De plus, ces systèmes nécessitent un temps de calcul important pour restituer les résultats (quand la requête contient plusieus objets). En effet, ils utilisent des algorithmes qui se basent sur des calculs lourds entre les nombreuses relations qui peuvent exister dans les graphes à comparer.

Afin de dépasser ces limites et de créer un systéme adapté à notre domaine de recherche, nous présentons dans la section suivante une étude sur le comportement des utilisateurs quand ils dessinent leurs croquis géographiques.

I. 5. Étude analytique des comportements d'utilisateurs

Bien que les habitudes des personnes qui griffonnent diffèrent considérablement de l'une à l'autre, la plupart des gens sont capables de dessiner un croquis ou de comprendre celui dessiné par quelqu'un d'autre. La raison de cette interprétation commune peut être l'utilisation de structures, symboles ou stratégies identiques lorsque les gens font leurs dessins. Il est également courant que les croquis qui sont générés dans le même domaine d'application aient une forte corrélation. Pour ces raisons, nous nous basons sur une étude analytique des croquis faite dans le domaine géographique [Blaser 2000]. La principale motivation de cette analyse est de comprendre les habitudes des utilisateurs quand ils font leurs dessins. Cette compréhension est une étape nécessaire afin de développer des techniques d'interprétation automatique des croquis.

L'étude a été menée sur des croquis dessinés par 32 participants. Il est demandé à chacun de dessiner trois croquis en se basant sur des descriptions écrites. Afin de réduire la complexité de l'étude, l'analyse se concentre sur les structures élémentaires des croquis (les objets dessinés, les relations binaires entre les composants et l'annotation). D'un point de vue abstrait, un croquis est un ensemble de coups de pinceau. Ces coups ne sont généralement pas considérés individuellement, mais ils sont regroupés pour former des objets. En se basant sur les géométries de ces objets et leurs configurations spatiales, il est possible de définir les concepts topologiques, métriques et directionnels d'un croquis.

Cette information est totalement suffisante pour comparer les configurations spatiales entre elles et évaluer leur similarité. Toutefois, l'expressivité d'un croquis peut être augmentée si l'aspect sémantique est pris en compte. Les gens ont souvent recours à des annotations écrites afin d'ajouter un sens spécifique à un objet.

Les trois sous-sections suivantes décrivent les résultats de l'analyse de ces éléments constitutifs d'un croquis.

I. 5. 1. Objets dessinés

Le terme « objet dessiné » correspond à une multitude de représentations, car il n'existe pas de règles strictes régissant la démarche utilisée pour représenter les objets du monde réel dans un croquis. Par exemple, une maison dans un croquis pourrait être présentée par un cercle, un carré ou par sa façade. Donc, il n'est pas trivial de comprendre le sens d'un objet dessiné sans savoir la démarche utilisée par les gens pour dessiner leurs croquis. D'autre part, il existe certainement des modèles communs pour faire les croquis, parce que sinon personne ne pourrait interpréter un croquis dessiné par quelqu'un d'autre. Dans la suite nous présentons les observations obtenues par l'étude de [Blaser 2000] concernant les objets dessinés et les règles qui peuvent être construites en se basant sur ces observations.

Observation 1 : *La plupart des objets dessinés sont représentés par des formes simples telles que des lignes ou des rectangles.*

Cette observation montre que les gens ont une tendance à garder leurs croquis simples et les objets dessinés abstraits. Elle indique également que le contexte et la configuration d'un croquis sont plus importants que la représentation de chaque objet.

Observation 2 : *Les deux classes les plus utilisées (les bâtiments et les routes) couvrent 53% de tous les objets dessinés et les neuf premières classes les plus fréquentes représentent 90% de tous les objets.*

Il est clair que ces classes varieront avec le changement du domaine d'application. Cependant, on peut estimer que pour un champ d'application spécifique, il y a un nombre limité de classes d'objets nécessaires pour interpréter une scène dessinée.

I. 5. 2. Relations spatiales

Le terme « relation » peut être défini comme « association naturelle, logique, ou virtuelle entre deux ou plusieurs entités qui sont liées l'une à l'autre ». L'interprétation d'une relation est généralement basée sur la perception d'une situation réelle par des êtres humains, ce qui la rend subjective. Pour décrire plus objectivement les relations, des théories ont été élaborées mettant l'accent sur les caractéristiques spécifiques de ces relations. Des théories au sujet des relations spatiales visent à décrire les relations entre les objets dans l'espace. Une relation spatiale binaire est un cas particulier où seulement deux

objets sont impliqués. Ces dernières sont souvent les plus utilisées en raison de leur simplicité. Le nombre de relations binaires possibles dans une configuration spatiale est assez important. Il augmente de façon polynomiale avec le nombre d'objets et il est donné par l'équation [1] pour *n* objets :

$$M = n * (n - 1) / 2 \qquad [1]$$

Dans la suite nous présentons les observations obtenues par l'étude concernant les relations spatiales et les règles qui peuvent être construites en basant sur ces observations.

Observation 1 : *Les objets dans un croquis sont généralement disjoints. Les relations non disjointes qui ont été enregistrées au cours de l'étude ne représente que 8,2% du nombre total possible des relations topologiques.*

En fait, la topologie n'est pas assez expressive pour décrire les situations où les objets sont disjoints. Dans de tels cas, les relations métriques et directionnelles relatives peuvent être utilisées pour décrire et préciser les configurations spatiales.

Observation 2 : *les relations métriques et directionnelles sont utilisées de manière implicite, ce qui les rend imprécises et approximatives.*

L'utilisation de cette information pour décrire une configuration spatiale nécessite une étape de réduction de l'imprécision.

I. 5. 3. Annotation

Une annotation est une note écrite décrivant un objet, un groupe d'objets ou une relation entre des objets. Elle est utilisée généralement pour décrire les caractéristiques qui ne peuvent pas être formulées graphiquement. L'étude montre qu'il existe trois principales raisons pour lesquelles les gens annotent leurs croquis :

- complexité : Pour associer une signification à un objet qui est difficile à représenter par les moyens graphiques ;
- importance : Pour mettre l'accent sur un objet ;
- ambiguïté : Pour faire la différence entre des objets qui partagent une même apparence.

Observation 1: *les annotations utilisées sont souvent simples (sous forme de groupe nominal). Peu de gens utilisent de longues expressions pour annoter un croquis.*

L'utilisation d'une ontologie peut être adaptée pour organiser les mots clés utilisés dans les annotations des croquis.

I. 6. Conclusion

La complexité des données spatiales rend les méthodes traditionnelles d'interaction non intuitives et entraîne une surcharge cognitive. C'est la raison pour laquelle ce type d'information est difficilement accessible aux utilisateurs qui en ont besoin. Intégrer de nouvelles modalités dans l'interface semble une approche prometteuse pour pallier à ce problème.

Ce chapitre présente les différentes modalités d'interaction en analysant leurs capacités à transmettre les données spatiales. Il était clair que le croquis (dessin) est la modalité la plus adaptée pour décrire les scènes spatiales. L'utilisation de cette modalité dans les interfaces utilisateur de SIG a un intérêt particulier, notamment dans les applications où l'information spatiale doit être retrouvée. Un état de l'art sur l'utilisation de cette modalité dans les systèmes de recherche d'information a été présenté afin de comprendre les limites de ces systèmes et comment les adapter à notre domaine de recherche.

Un croquis est une expression individuelle, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de syntaxe bien définie pour représenter une information par un croquis. Cependant, une personne est souvent capable de comprendre un croquis dessiné par quelqu'un d'autre, ce qui incite à penser qu'il y a des stratégies communes utilisées pour dessiner les croquis. Afin de comprendre ces stratégies et avoir la capacité de traduire un croquis en une requête utilisable dans l'interrogation, une étude des comportements des utilisateurs a été présentée à la fin de ce chapitre.

L'interrogation par croquis pose des nombreuses questions concernant le traitement de ces requêtes : comment décrire un croquis ? Comment le modéliser ? Comment organiser les données dans la base pour répondre à ce type de requêtes ? Dans le chapitre suivant, nous cherchons à répondre à ces questions à travers un tour d'horizon des principaux travaux proposés ces dernières années pour l'appariement des graphes.

Chapitre II :
Comparaison des croquis : État de l'art sur les méthodes d'appariement de graphes

Chapitre II : Comparaison des croquis : État de l'art sur les méthodes d'appariement de graphes 33

II. 1. Introduction 37

II. 2. Concepts et termes de base 37

II. 3. Représentation des données spatiales par graphes 38

II. 4. Définition et classification des méthodes d'appariement entre graphes 39

II. 4. 1. Appariement exact 39

II. 4. 1. 1. Arbre de recherche 40

II. 4. 1. 2. Autres techniques 41

II. 4. 2. Appariement inexact 43

II. 4. 2. 1. Arbre de recherche 44

II. 4. 2. 2. Optimisation continue 45

II. 4. 2. 3. Méthodes spectrales 47

II. 4. 2. 4. Autres techniques 47

II. 5. Conclusion 48

II. 1. Introduction

L'étape de formulation de requête est une étape importante dans le système de recherche d'information. La compatibilité entre l'interface d'utilisateur et la représentation des données dans le monde mental de l'utilisateur l'aide à optimiser sa manière d'exprimer sa demande. Ceci lui permet de réduire l'ambiguïté dans ses requêtes.

Les intérêts de l'interrogation par croquis pour les données spatiales ont été abordés dans le chapitre précédent. Dans ce chapitre nous cherchons une manière pour traduire ce type de requête dans une forme exploitable par l'ordinateur. Cette traduction doit contenir toute l'information (explicite ou implicite) transmise par le croquis et qui est nécessaire pour la récupération des données souhaitées. Les données dans les bases doivent être également modélisées afin de répondre à ce type de requête.

Une des organisations utiles qui peut être employée lorsqu'on travaille avec des descripteurs structurels ou rationnels tels que les données spatiales est le graphe [Jolion 2001].

L'utilisation des graphes dans la représentation des données structurées est devenue fréquente dans ces dernières années. L'intérêt de ce type de représentation réside dans sa capacité à représenter les variations et les différences structurelles entre plusieurs objets et la possibilité d'utiliser des algorithmes d'appariement de graphes (en anglais « graph matching ») dans le processus de comparaison de ces données.

Dans ce chapitre nous présentons en premier lieu les concepts et les termes de base du graphe. Ensuite, nous justifions l'intérêt de leur utilisation pour la représentation des données spatiales et des croquis à main levée.

La comparaison entre un croquis et les données dans la base (qui sont représentés par des graphes) est réalisée en utilisant une des méthodes d'appariement de graphes. Un état de l'art de ces méthodes sera exposé afin de montrer leurs avantages et leurs inconvénients. Nous nous basons sur cette étude pour proposer un nouvel algorithme adapté à notre domaine de recherche.

II. 2. Concepts et termes de base

Un graphe fini G = (V, E) est défini par deux ensembles : un ensemble fini $V = \{v_1, v_2, \ldots, v_n\}$ dont les éléments sont appelés nœuds, et un ensemble fini $E = \{e_1, e_2, \ldots, e_m\} \subseteq V \times V$, dont les éléments sont appelés arêtes. L'ordre du graphe est le nombre de nœuds dans ce graphe $|V| = n$.

Si deux nœuds v_i et $v_j \in V$ sont liés par une arête $e_0 = (v_i, v_j) \in E$ alors ils sont dits voisins ou adjacents. Les arêtes sont dites non orientées quand elles n'ont pas de

direction. Un graphe G_0 ne contenant que ce type d'arêtes est qualifié de « non orienté ». Lorsque les arêtes ont des directions, c'est-à-dire que (v_i, v_j) et (v_j, v_i) peuvent être distinguées, le graphe est dit orienté. Dans cette thèse nous nous intéressons aux graphes non orientés, mais notre méthode d'appariement peut être également appliquée aux graphes orientés. En outre, un graphe $G_0 = (V_0, E_0)$ est complet lorsque, pour toute paire de nœuds v_k et $v_l \in V_0$, il existe une arête $e_j = (v_k, v_l) \in E_0$.

Les arêtes et les nœuds d'un graphe peuvent apporter des informations : lorsque cette information est une étiquette simple (par exemple un nom ou un numéro), le graphe est appelé « graphe étiqueté ». Dans l'autres cas (les arêtes et les nœuds portent d'autres informations), le graphe est appelé « graphe attribué ».

Un chemin entre deux nœuds v_i et $v_j \in$ V est une séquence non vide de k différents nœuds $\{u_0, u_1, \ldots; u_k\}$ où ($u_0 = v_i$ et $u_k = v_j$) et $(u_{l-1}, u_l) \in$ E, $l = 1, \ldots, k$. Enfin, un graphe G_0 est dit acyclique lorsqu'il n'y a pas de cycles entre ses nœuds, indépendamment du fait que ce graphe est orienté ou non.

Dans la section suivante nous présentons la justification de l'utilisation du graphe pour représenter les données spatiales, en particulier pour les systèmes de recherche d'information spatiale.

II. 3. Représentation des données spatiales par graphes

Un nœud d'un graphe peut représenter tout type d'information. De plus, chaque nœud peut être décrit par un ensemble de caractéristiques. Les informations décrivant les relations entre ces nœuds sont exprimées par un ensemble d'arêtes, avec ou sans valeurs associées. Par exemple une arête peut exprimer une relation topologique, métrique, directionnelle ou temporelle. Les raisons menant à utiliser le graphe dans la présentation des données spatiales peuvent se résumer par les points suivants :

- le graphe est bien adapté pour présenter une configuration spatiale : analogie entre nœuds/arêtes et objets/relations ;
- les propriétés d'invariance. Par exemple, la présentation par graphe d'une configuration spatiale reste la même si elle est translatée, pivotée ou transformée en son image inversée.

Utiliser les graphes pour le stockage des informations spatiales est une proposition judicieuse. Toutefois, cela pose la question suivante : comment prendre en compte les besoins d'un utilisateur exprimant ses requêtes géographiques à l'aide d'un croquis ? En effet, un croquis symbolise une configuration géographique, par conséquent il peut être également représenté par un graphe. Ensuite, une méthode de comparaison entre graphes peut être utilisée afin d'identifier l'appartenance d'un croquis à un ensemble de structures déjà connues ou tout simplement pour trouver des structures semblables (c'est le cas dans

notre travail). Ce type d'opération se nomme « méthode d'appariement entre graphes ». La question qu'il convient alors de se poser est : comment modéliser le concept de ressemblance ?

Dans la section suivante nous présentons une classification des méthodes d'appariement entre graphes issues de la littérature et un tour d'horizon pour les importantes méthodes utilisées.

II. 4. Définition et classification des méthodes d'appariement entre graphes

L'appariement entre graphes est le processus qui consiste à rechercher d'une correspondance entre les nœuds et les arêtes de deux graphes, tout en assurant la satisfaction des certaines contraintes.

Généralement, les méthodes d'appariement sont divisées en deux grandes catégories : la première contient les méthodes d'appariement exact qui nécessitent une correspondance stricte entre les deux graphes ou au moins entre des sous-parties. La deuxième catégorie définit les méthodes d'appariement inexact, où une mise en correspondance peut se produire entre deux graphes même s'ils sont différents dans une certaine mesure.

Dans les deux sous-sections suivantes, nous présentons respectivement la définition de chacune de ces catégories et un état de l'art des méthodes associées regroupées selon leurs algorithmes de base.

II. 4. 1. Appariement exact

L'appariement exact est caractérisé par le fait que la connexité entre les nœuds doit être préservée : si deux nœuds (du premier graphe) sont liés par une arête, ils correspondent à deux nœuds (du deuxième graphe) qui sont aussi liés par une arête.

Nous détaillons les méthodes d'appariement exact de la forme la plus stricte à la plus relâchée. Dans la première, le « **graphe isomorphe** », la condition de connexité doit être vérifiée dans les deux sens (l'application doit être bijective). En d'autres termes, une correspondance « un à un » doit exister pour chaque nœud du premier graphe et chaque nœud du deuxième graphe. Une forme moins exigeante est le « **sous-graphe isomorphe** » qui correspond à un isomorphe entre l'un des deux graphes et un sous-graphe de l'autre. Certains auteurs comme [Wong et al. 1990] ont utilisé le dernier terme dans un sens plus faible, en relâchant la contrainte de la préservation de connexité dans les deux sens. Ce type d'appariement est appelé par d'autres auteurs le « **monomorphe »** [Ghahraman et al. 1980]. Ceci exige que chaque nœud et chaque arête du premier graphe soit associé respectivement à un nœud et une arête distincts du second. Cependant, le

deuxième graphe peut avoir des nœuds et des arêtes supplémentaires. Une forme encore plus faible de l'appariement exact est « **homomorphe** », qui relâche la contrainte concernant le fait que les nœuds du premier graphe doivent être projetés sur des nœuds distincts du second, par conséquent la correspondance peut être du type « plusieurs à un ». Enfin, un autre type d'appariement cherche une isomorphe d'un sous graphe du premier avec un sous graphe du second. Telle correspondance n'est pas définie de façon unique, le but de l'algorithme est de trouver le plus grand sous-graphe pour lequel une telle correspondance existe. Par conséquent, ce problème est connu dans la littérature sous la désignation « **rechercher le sous-graphe commun maximal** » (SCM) entre deux graphes. En fait, il existe deux manières de définir le maximum : dans la première, le maximum fait référence au nombre de nœuds, alors que dans la seconde, c'est le nombre d'arêtes qui est pris en compte.

La plupart des algorithmes d'appariement exact sont basés sur une certaine forme d'arbre de recherche. D'autres techniques sont également utilisées comme la théorie des groupes, l'arbre de décision, etc. Dans la suite nous présentons les travaux les plus connus qui ont abordé l'appariement exact. Ils sont regroupés en deux catégories : la première pour les algorithmes qui sont basés sur l'arbre de recherche et la seconde pour les autres techniques.

II. 4. 1. 1. Arbre de recherche

L'idée de base de ces techniques est qu'un appariement partiel (initialement vide) est itérativement élargi en y ajoutant de nouvelles paires de nœuds appariés. Les nouvelles paires doivent :

- assurer leur compatibilité avec les contraintes imposées par le type d'appariement souhaité ;
- prendre en compte les paires déjà appariées dans l'appariement partiel ;
- élaguer le plus tôt possible les chemins infructueux.

En fin de compte, soit l'algorithme trouve un appariement complet, soit il atteint un point où l'appariement partiel ne peut plus être élargi. Dans le dernier cas, l'algorithme fait un marche arrière « retour sur trace » (en anglais « backtracking ») : annule les derniers ajouts jusqu'à trouver un appariement partiel pour lequel une extension alternative est possible. Si toutes les possibilités qui satisfaisons les contraintes ont été déjà essayées, l'algorithme s'arrête (l'appariement entre ces graphes n'est pas possible).

Plusieurs stratégies de mise en œuvre de ce type d'algorithme ont été utilisées. La plus simple est « la recherche en profondeur d'abord » qui requiert moins de mémoire que d'autres. De plus, il convient très bien à une formulation récursive. Une propriété intéressante de cette stratégie est qu'il peut facilement prendre en compte les attributs des nœuds et des arêtes. Ceci est très important lorsque les attributs jouent un rôle dans la réduction du temps d'appariement.

L'algorithme d'Ullman [Ullman 1976] est le premier et le plus connu de cette famille. En dépit de son ancienneté, il est encore couramment employé. Cet algorithme aborde les problèmes d'isomorphe, du sous-graphe isomorphe et du monomorphe. L'auteur a suggéré également une manière de l'employer pour le problème de SCM, bien que sa nature le fasse moins adaptée à ce type de problème. L'auteur a proposé une procédure de raffinement qui utilise une matrice des futures paires possibles de nœuds à apparier afin d'élaguer les chemins infructueux. A chaque étape, les paires qui ne sont pas compatibles avec l'appariement partiel seront supprimées.

[Ghahraman et al. 1980] a proposé un autre algorithme pour le cas du monomorphe. Les auteurs ont utilisé une technique semblable à celle de [Ullman 1976] pour élaguer l'espace de recherche. Dans cette technique, un « netgraphe » est obtenu à partir du produit cartésien des nœuds des deux graphes à apparier. Les auteurs ont prouvé que, si deux graphes sont monomorphe, leur « netgraphe » doit satisfaire deux conditions : une condition nécessaire forte et une condition nécessaire faible (mais plus facile à vérifier). De ces conditions dérivent deux versions d'algorithme (sur lesquelles les conditions sont utilisées pour détecter les solutions infructueuses). Un inconvénient majeur de cet algorithme est que le « netgraph » est représenté en utilisant une matrice de taille $n^2 * n^2$, où n est l'ordre du plus grand graphe. Par conséquent, cet algorithme ne peut être utilisé que pour des petits graphes.

Un algorithme plus récent pour le cas de l'isomorphe et du sous-graphe isomorphe est l'algorithme de VF [Cordella et al. 2000]. Les auteurs définissent une méthode basée sur l'analyse des ensembles de nœuds qui sont adjacents à ceux déjà pris dans l'appariement partiel. Selon [De Santo et al. 2003], cette méthode est assez rapide, ce qui a mené à une amélioration significative du temps d'appariement (dans des nombreux cas) par rapport aux autres algorithmes. Dans [Cordella et al. 2001] les auteurs ont proposé une modification de cet algorithme afin de réduire l'espace mémoire nécessaire. Cette amélioration rend cet algorithme intéressant pour travailler avec les grands graphes.

Enfin, l'arbre de recherche a aussi été utilisé pour le problème de SCM. Les algorithmes les plus célèbres sont cités dans [Bron et al. 1973] et [Balas et al. 1986]. La possibilité d'utiliser les algorithmes parallèles dans le problème de SCM a été étudiée dans [Shinano et al. 1998].

II. 4. 1. 2. Autres techniques

Nauty [Mckay 1981] est probablement l'algorithme pour les graphes isomorphes le plus intéressant qui n'est pas basé sur l'arbre de recherche. Il est considéré par beaucoup d'auteurs comme l'algorithme pour les graphes isomorphes le plus rapide disponible jusqu'à présent. Il est basé sur la théorie des groupes. En fait, Il utilise certains résultats provenant de ce cadre théorique pour construire « le groupe automorphe » pour chaque graphe. À partir de ce group, un étiquetage est dérivé, qui introduit un ordre pour chaque

nœud. Cet ordre est défini de façon unique pour chaque classe de graphe isomorphe. Ainsi, l'isomorphe de deux graphes peuvent être mesuré en vérifiant simplement l'égalité des matrices d'adjacence de leurs formes étiqueté. Cette vérification de l'égalité peut être faite en $O(n^2)$, mais la construction de l'étiquetage nécessite un temps qui est dans la plupart des cas exponentiel. D'ailleurs, cet algorithme a généralement une performance meilleure comparativement aux autres. En effet, il a été prouvé que, dans certaines conditions, il peut dépasser en performance d'autres algorithmes (comme le VF2) mentionnés ci-dessus [Foggia et al. 2001]. Par contre, il est malheureusement impossible d'exploiter les attributs des nœuds et des arêtes dans le processus d'appariement.

Un autre algorithme qui s'intéresse aux graphes isomorphes et au sous-graphe isomorphe a été présenté en [Messmer 1995]. Cette méthode est conçue afin de faire l'appariement entre un graphe et une base de graphes. Elle est basée sur une décomposition récursive de chaque graphe de la base dans des sous graphes plus petits, jusqu'à arriver à un niveau trivial (un nœud). Le processus d'appariement exploite le fait que certaines parties sont communes à plusieurs graphes dans la base, afin d'éviter la répétition de leur comparaison avec le graphe requête. De cette façon, le temps total d'appariement a une dépendance linéaire avec le nombre de graphes de la base.

Les auteurs de [Messmer et al. 1997] ont proposé un algorithme plus performant pour l'isomorphe et le sous-graphe isomorphe entre un graphe et une base de graphes. En phase de prétraitement, un arbre de décision est construit à partir des graphes de la base. En utilisant cet arbre, un graphe d'entrée peut être comparé à toute la base en $O(n^2)$ par rapport à la taille de ce graphe, et indépendamment du nombre de graphes dans la base. Une extension de cet algorithme pour SCM a été présentée dans [Shearer et al. 1997]. Plus récemment, les mêmes auteurs ont également proposé une extension de cette méthode dans [Shearer et al. 2001]. Cette extension permet de prendre en compte une séquence de graphes qui évoluent lentement au fil du temps. Il y a bien sûr un coût lié à la performance de cet algorithme :

- la phase de prétraitement nécessite un temps exponentiel par rapport au nombre de nœuds des graphes dans la base ;
- un autre problème concerne l'espace nécessaire pour stocker l'arbre de décision qui est aussi exponentiel par rapport au nombre de nœuds.

Pour ces raisons, cet algorithme n'est pratiquement applicable en pratique que pour des graphes de très petite taille.

Un autre article [Irniger et al. 2001] a proposé l'utilisation d'arbres de décision pour accélérer le processus d'appariement. Dans cet article, l'arbre de décision n'est pas utilisé dans le processus d'appariement, mais seulement pour filtrer une base de graphes, puis un algorithme d'appariement complet a été appliqué sur ceux qui subsistent.

II. 4. 2. Appariement inexact

Les contraintes strictes imposées par l'appariement exact sont généralement trop rigides pour la comparaison de deux graphes. D'une part, les données sont souvent soumis à des déformations dues à plusieurs causes (le manque d'information, le bruit dans le processus d'acquisition, etc.), ce qui rend leur représenation peu différente de leur modélisation (formes de représentation) idéale. Ainsi, le processus d'appariement doit être tolérant : il doit prendre en compte ces déformation en relaxant les contraintes d'appariement. D'autre part, la plupart des algorithmes d'appariement exact ont besoin d'un temps exponentiel. Pour cela, il s'avère plus adapté d'utiliser des algorithmes qui ne garantissent pas de trouver la meilleure solution, mais qui donnent une bonne solution approchée dans un délai raisonnable.

Ces deux besoins ont conduit au développement d'algorithmes d'appariement inexact. Habituellement, ces algorithmes n'exigent pas une correspondance exacte entre les graphes. Au lieu de cela, ils pénalisent la dissimilitude en attribuant un coût à chaque différence.

Deux catégories de tels algorithmes existent. Dans la première, les algorithmes estiment le coût global d'appariement et restituent les graphes dont ce coût est minimal. Cela implique que si la solution exacte existe, elle sera retrouvée par de tels algorithmes. Ce type d'algorithmes (qui sont appelés optimaux) permet de résoudre le problème de déformation mais ils n'assurent pas une amélioration en temps de calcul. Ils sont généralement plus coûteux que leurs homologues exacts.

L'autre type d'algorithmes d'appariement inexact (qui sont appelés approximatifs) cherche seulement à minimiser les coûts locaux (au niveau de chaque nœud) dans le processus d'appariement. Les résultats obtenus ne sont pas généralement très différents de ceux obtenus par les algorithmes optimaux. L'inconvénient majeur de ces algorithmes est l'incapacité de garantir de trouver la solution exacte si elle existe. Par contre, cette perturbation dans le résultat est compensée par un gain du temps qui est généralement polynomial.

Pour définir ce coût, un nombre important d'algorithmes se base sur la détection des erreurs (déformations) qui se produisent (nœud manquant, etc.) et en attribuant un coût à chaque type d'erreur. Ces anomalies sont souvent identifiées comme des « erreurs-correction » ou « erreurs-tolérance ». Une autre manière de définir le coût consiste à introduire un ensemble d'opérations d'édition (insertion d'un nœud, suppression d'un nœud, etc.) et à attribuer un coût à chaque opération. Le coût de la liste des opérations nécessaires pour assurer la transformation d'un graphe à un autre est calculé. Ce coût est appelé le « coût d'édition ».

Les algorithmes d'appariement exact entre graphes sont moins diversifiés que ceux d'appariement inexact. Dans la suite nous présentons les travaux les plus connus qui ont abordé la dernière catégorie d'algorithmes. Ces travaux seront regroupés en quatre catégories : l'arbre de recherche, l'optimisation continue, les méthodes spectrales et les autres techniques.

II. 4. 2. 1. Arbre de recherche

L'arbre de recherche et le retour sur trace sont également utilisés pour l'appariement inexact. Les coûts des appariements partiels sont utilisés pour diriger le processus d'appariement, soit en élaguant les chemins infructueux, soit en déterminant l'ordre dans lequel l'arbre de recherche doit être traversé.

[Tsai et al. 1979] détaille le premier algorithme optimal de cette catégorie. Dans ce travail, une définition formelle du coût d'édition a été présentée. Bien que le formalisme reste général, l'algorithme proposé ne prend en compte que les opérations de substitution (mise à jour) de nœuds. Par conséquent, les graphes testés doivent être structurellement isomorphes. Les mêmes auteurs ont proposé une extension de cette méthode pour prendre en compte les opérations d'insertion et de suppression des nœuds [Tsai et al. 1983]. Une amélioration pour prendre en compte les opérations d'édition pour les arêtes a été présentée dans [Wong et al. 1990].

Les auteurs de [Eshera et al. 1984] ont proposé une méthode d'appariement inexact approximative qui est basée sur la décomposition de deux graphes en des graphes élémentaires. Un graphe élémentaire est composé d'un nœud, de ses voisins ainsi que des arêtes qui le relient à ces derniers. De cette manière, l'appariement entre les deux graphes est simplifié. Cela revient à trouver une adéquation entre deux ensembles de graphes élémentaires (chaque graphe est désormais présenté par un ensemble de sous-graphes). Cette adéquation peut être réalisée en temps polynomial.

Parmi les travaux fondés sur l'arbre de recherche, nous pouvons citer aussi la méthode d'appariement inexact approximative de [Dumay et al. 1992], où l'algorithme de recherche A* [Rich 1983] a été utilisé. Le même algorithme a été employé plus récemment dans [Berretti et al. 2001]. Dans ce dernier, les futurs coûts d'appariement partiel sont estimés en se basant sur une méthode d'appariement entre graphes bipartis. L'idée de base consiste à trouver le plus grand appariement entre deux ensembles de nœuds formant un graphe biparti (un graphe est biparti s'il existe une partition de son ensemble de nœuds en deux sous-ensembles U et V telle que chaque arête possède une extrémité dans U et l'autre dans V). Les auteurs ont prouvé que l'appariement selon cette manière peut être fait en temps polynomial. L'algorithme A* a été plus récemment utilisé dans [Gregory et al. 2002]. La méthode proposée ne prend en compte que les coûts des futurs nœuds non appariés. Les auteurs ont prouvé (pour les petits graphes) que l'imprécision dans

l'estimation du coût peut être largement compensée par le gain de temps obtenu en utilisant cette méthode moins complexe.

La parallélisation a également été utilisée dans l'appariement inexact. En particulier, un algorithme parallèle basé sur l'arbre de recherche a été présenté dans [Allen et al. 1997]. Cet algorithme exige que les graphes comparés aient le même nombre de nœuds.

II. 4. 2. 2. Optimisation continue

Les méthodes d'appariement mentionnées ci-dessus se basent sur la formulation du problème en termes de graphes (c'est-à-dire en nœuds et en arêtes). Une autre approche consiste à le transformer en un problème d'optimisation continue. Ensuite, de nombreux algorithmes d'optimisation peuvent être utilisés pour trouver une solution à ce problème. Mais ce type d'algorithmes ne garantit pas l'optimalité de la solution. Néanmoins, dans de nombreux contextes, cette approche est très attractive en raison de son coût de calcul extrêmement réduit. Il est habituellement dépendant polynômialement de la taille des graphes.

La première famille de ces méthodes utilise la technique de « relâchement d'étiquetage » (en anglais « relaxation labeling »). L'un des travaux pionniers de cette approche est présenté dans [Fischler et al. 1973]. L'idée de base consiste à assigner à chaque nœud d'un graphe une étiquette parmi un ensemble discret d'étiquettes possibles. Les étiquettes sont utilisées pour déterminer les correspondances des nœuds dans l'autre graphe. En fait, chaque nœud est associé à un vecteur contenant les probabilités d'attacher ce nœud à toutes les étiquettes existantes. Initialement, ces probabilités sont calculées en se basant sur les attributs du nœud, sa connectivité et éventuellement d'autres informations disponibles. Puis, les éléments de chaque vecteur sont modifiés itérativement en tenant compte des probabilités des nœuds voisins, jusqu'à ce que le processus converge vers un point fixe, ou un nombre maximal d'itérations est atteint. À ce stade, l'étiquette ayant la probabilité maximale est choisie pour chaque nœud.

Le fait que les attributs des nœuds et des arêtes sont utilisés uniquement dans l'initialisation du processus présente un inconvénient majeur de cette formulation. De plus, le processus d'itération n'est pas fondu sur une base théorique [Kittler et al. 1989]. Ces problèmes ont été résolus dans des travaux plus récents adoptant cette technique. En particulier, les auteurs de [Kittler et al. 1989] ont fourni un cadre probabiliste pour cette formulation, dans lequel les règles utilisées pour mettre à jour les probabilités sont prouvées par une motivation théorique. Dans [Christmas et al. 1995] une méthode basée sur ce cadre théorique a été proposée. Elle permet de prendre en compte les attributs des nœuds et des arêtes pendant le processus d'itération. Un nouvel algorithme d'appariement sur cette base théorique a été proposé dans [Myers et al. 2000]. Les auteurs ont introduit la définition de distance d'édition bayésienne. Enfin, les auteurs de [Torsello et al. 2001] ont proposé de l'utiliser de la même façon pour calculer la distance d'édition entre les

arbres. Un inconvénient majeur de cette famille de méthodes concerne le fait que la correspondance entre les nœuds et les étiquettes est fait dans un seul sens : à la fin de l'algorithme, chaque nœud a une seule étiquette, mais il n'y a aucune garantie que chaque étiquette soit attribuée à un seul nœud. Pour certaines applications, ceci ne constitue pas un gros problème.

Une autre famille de méthodes est basée sur la formulation du problème comme un Appariement des Graphes Pondérés (AGP en anglais WGM). Cela consiste à trouver une correspondance entre deux sous-ensembles de nœuds des deux graphes (généralement exprimée par une matrice d'appariement *M*) en prenant en compte leurs arêtes qui sont associées avec des poids. Les éléments de *M* sont contraints aux valeurs discrètes {0 et 1} et la somme de chaque ligne et de chaque colonne ne doit pas être supérieure à 1. Ce problème est transformé en un continu lorsque les valeurs (les éléments de *M*) varient entre 0 et 1. Dans ce cas, le problème AGP devient un problème d'optimisation quadratique. Une limitation importante de cette approche concerne le fait que les nœuds ne peuvent pas avoir des attributs et que les arêtes ne peuvent avoir d'autres attributs que leur poids. Cette restriction impose une limite sévère sur l'utilisation de l'information sémantique souvent disponible dans les applications réelles.

Le premier travail basé sur cette formulation est présenté dans [Almohamad et al. 1993]. Dans cet article, le problème quadratique est linéarisé et résolu en utilisant l'algorithme du « Simplexe » [Lawler 1976]. La solution approximative trouvée est ensuite reconverti en forme discrète en utilisant la méthode « Hongroise » [Lawler, 1976].

Une autre méthode dans cette famille basée sur l'approche de décomposition lagrangienne [Guignard et al. 1987] a été présentée dans [Rangarajan et al. 1996]. Dans cette méthode, les contraintes sur les lignes et sur les colonnes de la matrice *M* sont résolues séparément, puis fusionnées par le biais d'un multiplicateur de Lagrange. Les auteurs ajoutent une fonction d'auto-amplification de terme pour briser la symétrie dans l'espace des solutions, qui pourrait être un obstacle à la convergence de l'algorithme si plusieurs solutions optimales existent.

Plusieurs autres méthodes d'appariement inexact basées sur l'optimisation continue ont été proposées ces dernières années. Entre autres, il existe l'Appariement Flou de Graphes (AFG en anglais FGM) [Medasani et al. 2001], qui est une version simplifiée d'AGP basée sur la logique floue. En fait, le calcul de coût d'appariement des deux nœuds proposé dans cette méthode ne dépend pas des autres nœuds, ce qui la rend plus simple qu'AGP.

Une autre approche plus récente a été présentée dans [Van Wyk et al. 2002]. Elle est basée sur la théorie d'Hilbert (en anglais « Reproducing Kernel Hilbert Spaces (RHKS) »)

[Van Wyk et al. 2000] afin de transformer l'appariement en un problème de système d'identification. Ce dernier est résolu par la construction d'un interpolateur RKHS.

II. 4. 2. 3. Méthodes spectrales

Les méthodes spectacles sont basées sur l'observation suivante : les valeurs propres et les vecteurs propres de la matrice d'adjacence d'un graphe sont invariants par rapport aux permutations des nœuds. Par conséquent, si deux graphes sont isomorphes, leurs matrices d'adjacence auront les mêmes valeurs/vecteurs propres. Malheureusement, l'inverse n'est pas vrai : nous ne pouvons pas déduire de l'égalité des valeurs/vecteurs propres que deux graphes sont isomorphes. Cependant, les utiliser pour le processus d'appariement est judicieux puisque le calcul des valeurs/vecteurs propres est un problème bien étudié, calculable en un temps polynomial. En revanche, ces méthodes ne sont pas en mesure d'exploiter les attributs des nœuds et des arêtes, ce qui est souvent nécessaire dans le processus d'appariement.

Le premier algorithme de cette catégorie est présenté dans [Umeyama 1988]. L'auteur a utilisé les valeurs/vecteurs propres des matrices d'adjacence des graphes pour dériver une expression de la matrice orthogonale (sous l'hypothèse que les graphes sont isomorphes). A partir de cette expression, il a conçu une méthode de calcul de la matrice de permutation optimale lorsque les deux graphes sont isomorphes, et de matrice de permutation sous-optimale si les deux graphes sont quasi isomorphes. Malheureusement, s'il n'est pas connu à l'avance que les graphes sont quasi isomorphes, cette méthode produit un résultat très médiocre.

Une méthode combinant l'approche spectrale avec l'idée de regroupement a été présentée dans [Kosinov et al. 2002]. Dans cette méthode, un espace vectoriel, appelé l'espace propre du graphe, est définie en utilisant les vecteurs propres des matrices d'adjacence et les nœuds qui sont projetés comme des points dans cet espace. Ensuite, un algorithme de regroupement a été utilisé pour trouver les nœuds des deux graphes qui doivent être appariés. Les auteurs ont montré que cette méthode est robuste à la distorsion des graphes.

II. 4. 2. 4. Autres techniques

La méthode de décomposition introduite dans [Messmer et al. 1997] pour l'appariement exact a été étendue pour l'appariement inexact dans [Messmer et al. 1998]. Les auteurs ont montré que leur algorithme peut estimer les coûts optimaux d'appariement d'un graphe avec une base en temps polynomial (en fonction du nombre de graphes de la base). Les auteurs de [Fuchs et al. 1999] ont proposé une amélioration de cet algorithme en utilisant une méthode stochastique afin de limiter l'espace de recherche. Les mêmes auteurs ont étendu la méthode dans [Fuchs et al. 2000] en permettant

l'exploitation des connaissances disponibles du domaine d'application dans le processus d'appariement.

Des méthodes d'appariement, d'une deuxième famille, sont basées sur l'utilisation des réseaux de neurones ([Shoukry et al. 1996], [Suganthan et al 1998], etc.). La plupart de ces méthodes emploient un réseau de neurones de type Hopfield [Hopfield et al. 1987] qui cherche à minimiser l'énergie. Une autre approche présentée dans [Mauro et al. 2001] a proposé l'utilisation d'un réseau de neurones récurrents pour calculer la distance entre les graphes orientés acycliques. Cette technique se base sur la projection des graphes dans un espace vectoriel et sur l'utilisation de la distance euclidienne

Les algorithmes génétiques sont également utilisés dans l'appariement entre graphes. Parmi les travaux qui se sont penché sur ces algorithmes, nous pouvons citer [Liu et al. 1995] où un algorithme micro-génétique est appliqué pour résoudre des AGP problème, [Wang et al. 1997] où un algorithme génétique est utilisé pour trouver l'« erreurs-correction » et [Perchant et al. 1999] où un algorithme génétique est employé pour un homomorphe flou. Un algorithme génétique intéressant est présenté dans [Khoo et al. 2001] pour trouver le SCM entre deux graphes.

II. 5. Conclusion

Nous avons prouvé, dans le cadre de ce chapitre, que le graphe est une structure bien adaptée pour représenter l'information spatiale et le croquis dessiné par l'utilisateur en particulier. Il permet de représenter les variations et les différences structurelles entre les objets géographiques d'une manière efficace.

Un état de l'art des méthodes utilisées pour comparer les structures représentées par des graphes a été synthétisé dans ce chapitre. Ces méthodes sont divisées en deux grandes catégories : les méthodes d'appariement exact et les méthodes d'appariement inexact. Nous avons présenté les méthodes de la première catégorie dans deux sections : la première pour celles qui sont basées sur l'arbre de recherche et la seconde pour celles qui sont basées sur d'autres techniques. Les méthodes de la deuxième catégorie sont à la fois nombreuses et diversifiées (basées sur des théories différentes) par rapport à celles de la première catégorie. Elles sont regroupées en quatre sections : l'arbre de recherche, l'optimisation continue, les méthodes spectrales et les autres techniques.

Cet état de l'art, nous a permis de montrer que le problème d'appariement des graphes est toujours d'actualité. Le défi majeur consiste à bénéficier des informations disponibles dans notre domaine de recherche afin de développer un modèle et une méthode d'appariement des graphes pour assurer un performance et pertinence de notre système de recherche par croquis.

Partie 2 :
Gestion des données géographiques :
Propositions des modèles et un prototype d'interrogation par croquis

Chapitre III :
Notre proposition :
Vers la numérisation des croquis

Chapitre III : Notre proposition : Vers la numérisation des croquis 51

III. 1. Introduction 55

III. 1. 1. Modèle générique de configuration spatiale 55

III. 1. 2. Utilisation du graphe pour instancier ce modèle 56

III. 1. 3. Discussion sur le type de graphe optimal pour représenter une configuration spatiale 57

III. 2. Méthodes de simplification du graphe 58

III. 2. 1. Minimisation du nombre de relations en utilisant la sémantique 58

III. 2. 2. Minimisation du nombre de relations en utilisant le contexte spatial 59

III. 2. 3. Discussion sur les méthodes de simplification du graphe 59

III. 3. Modèle de données géographiques 60

III. 3. 1. Modèle de réseau géographique 60

III. 3. 2. Modèle de couche de régions 65

III. 3. 2. 1.Notre démarche pour construire le graphe de voisinage spatial 66

III. 3. 2. 2.Exemple illustratif de notre démarche: 67

III. 3. 2. 3.Discussions 71

III. 4. Méthodes d'appariement et mesures de similarité 72

III. 4. 1. Méthode d'appariement et mesures de similarité pour les réseaux géographiques 73

III. 4. 1. 1.Réseaux presque identiques 74

III. 4. 1. 2.Réseaux similaires 76

III. 4. 2. Méthode d'appariement et mesures de similarité pour les couches des régions 79

III. 4. 2. 1.Au niveau des groupes 80

III. 4. 2. 2.Au niveau des objets 83

III. 4. 3. Mesures de similarité pour les requêtes multi-couches 85

III. 5. Conclusion 86

III. 1. Introduction

Indépendamment de l'interaction avec l'utilisateur, les performances d'un système de recherche d'information dépendent essentiellement de la représentation des informations et la méthode utilisée pour comparer ces informations avec les requêtes réalisées par l'utilisateur. Ces deux opérations dépendent de la nature de données interrogées.

Dans notre étude, nous cherchons à faciliter l'accès des utilisateurs aux données spatiales représentées sous le mode vectoriel en utilisant les croquis. En effet, ce type de données est généralement caractérisé par des attributs non spatiaux et des attributs spatiaux. Les attributs non spatiaux sont employés pour représenter les informations descriptives des objets (identifiant, nom, etc.), tandis que les attributs spatiaux sont employés pour définir les propriétés géométriques et les relations spatiales entre les composants. Ces relations peuvent être des relations topologiques, métriques ou directionnelles. Les relations topologiques décrivent la connectivité et la contiguïté entre les objets. Les relations métriques sont représentées par des valeurs déterminées par une fonction de distance. Les relations directionnelles décrivent comment un objet est placé par rapport aux autres.

La gestion des données spatiales sous ce mode concerne donc deux types d'information : l'information géométrique et les relations spatiales. L'information géométrique décrit l'objet lui-même et ne dispose d'aucune information sur son contexte, alors que les relations spatiales capturent le contexte de l'objet. Par conséquent, même si les relations spatiales sont généralement considérées comme une information dérivée de l'information géométrique, elles semblent être plus appropriées pour décrire les données spatiales de manière plus générale et plus riche dans la sémantique.

Nous présentons dans ce chapitre, dans un premier temps un modèle générique de configuration spatiale, la façon d'utiliser un graphe pour instancier ce modèle et l'intérêt d'utiliser un graphe réduit par rapport au complet. Ensuite, nous examinons les différentes approches pour simplifier une représentation par graphe et leur adaptation à notre domaine de recherche. Enfin, nous expliquons notre modèle, les méthodes d'appariement et les mesure de similarité qui nous proposons.

III. 1. 1. Modèle générique de configuration spatiale

Afin d'assurer l'accès optimal à l'information, le modèle de représentation de requête doit être homogène avec la manière de représentation des données. Dans la suite de cette thèse, à moins de préciser son objet (requête ou modèle de données), la représentation des configurations spatiales fait référence simultanément à la fois à la requête et à la représentation des données.

Cette représentation doit refléter les caractéristiques importantes qui sont nécessaires pour ce type d'interrogation. Elle doit également intégrer les résultats obtenus par l'étude analytique des comportements de l'utilisateur présentée dans le premier chapitre (cf. I.5).

Une configuration spatiale peut être généralement décrite par ses composants et les relations entre eux. La figure III. 1 représente un modèle générique d'une configuration spatiale.

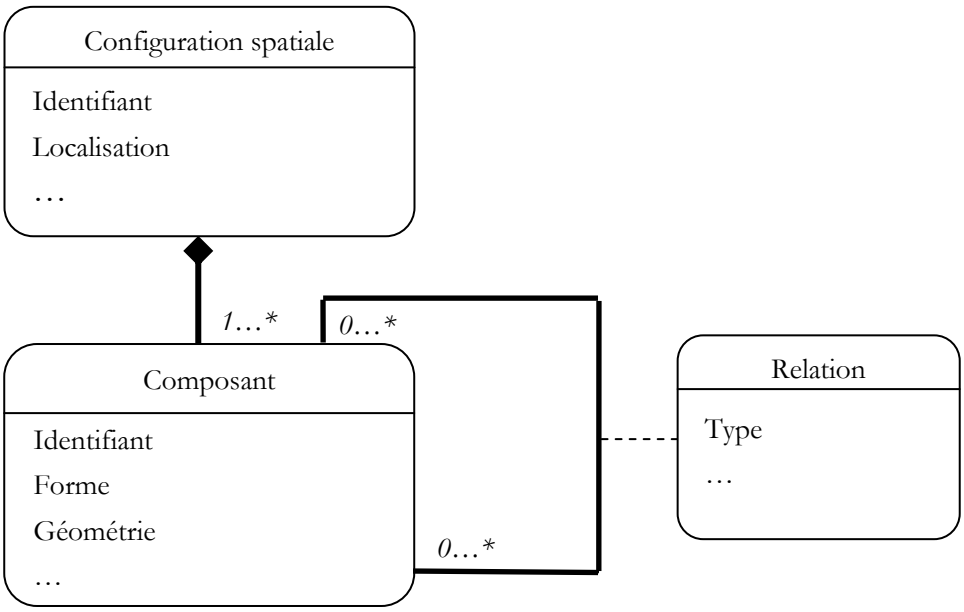


Figure III. 1. Représentation générique d'une configuration spatiale

Une configuration spatiale est composée d'un ou plusieurs composants. Chaque composant est lié à tous les autres composants de la même configuration spatiale.

En effet, les informations géométriques et les formes d'objets représentent la partie visuelle des données tandis que les relations spatiales sont représentées par un réseau virtuel qui lie les objets les uns aux autres.

III. 1. 2. Utilisation du graphe pour instancier ce modèle

Le réseau virtuel entre les objets peut être représenté par un graphe. Ainsi, chaque objet est représenté par un nœud, et les relations spatiales sont représentées par des arêtes. La figure III. 2 (a) représente une configuration spatiale et la figure III. 2 (b) montre sa représentation en utilisant un graphe.

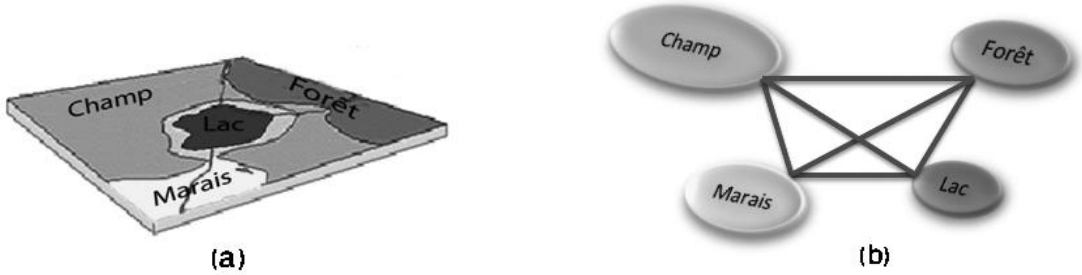


Figure III. 2. Représentation d'une configuration spatiale (a) par un graphe complet (b)

Le graphe dans la figure III. 2 (b) est complet : chaque objet est associé à tous les autres objets de la configuration. Pour chaque nouvel objet, *n-1* arêtes doivent être ajoutées. Le nombre d'arêtes *m* dans un graphe complet de *n* objets est donné par l'équation [1] :

$$m = \frac{n*(n-1)}{2} \qquad [1]$$

Bien que cette représentation soit très robuste, elle souffre d'un inconvénient majeur lié à la complexité du graphe dans le cas d'un grand nombre d'objets

III. 1. 3. Discussion sur le type de graphe optimal pour représenter une configuration spatiale

Le graphe complet est une représentation stable, car tout changement dans une configuration est propagé à tous les autres nœuds (par exemple le déplacement d'un objet). Toutefois, cette stabilité est assurée au détriment du nombre d'arêtes qui croît exponentiellement avec le nombre d'objets. Cette augmentation rend le graphe complet inadapté pour représenter efficacement les données géographiques, puisque le nombre d'objets dans une configuration géographique est assez important. D'autre part, les utilisateurs ne prennent pas en compte toutes les relations spatiales entre les objets quand ils interprètent une configuration géographique. Cette représentation est faite de manière sélective (en considérant la sémantique ou le contexte spatial). Un choix « intelligent » d'un sous ensemble de relations a donc beaucoup d'avantages par rapport à une modélisation exhaustive :

- l'utilisation d'un graphe réduit permettra de diminuer la taille nécessaire pour stocker ces données dans la base, ainsi l'accès à l'information deviendra plus rapide et plus efficace ;
- la recherche par croquis représenté par un graphe réduit est plus rapide que par un graphe complet, parce que le nombre de composants qui doivent être comparés est moindre ;
- la représentation par un graphe complet contient des informations redondantes. Par exemple, les objets situés au sud d'un objet seront automatiquement au sud de

tous les objets situés à son nord. La réduction du nombre d'arêtes dans un graphe permet de diminuer cette redondance ;
- la mise à jour des nœuds d'un graphe réduit est plus facile parce qu'elle est limitée à un sous ensemble d'éléments qui ont une relation avec ces nœuds.

Nous pouvons déduire ainsi que le développement d'une méthode qui simplifie la complexité de la représentation d'une configuration spatiale par un graphe, tout en maintenant son expressivité, est une contribution importante permettant d'augmenter l'efficacité du modèle proposé. La section suivante examine les différentes approches pour atteindre cet objectif.

III. 2. Méthodes de simplification du graphe

Pour réduire le nombre de relations, il est nécessaire de définir une fonction qui détermine si une relation est importante ou pas. En effet, l'importance d'une relation peut être exprimée par la sémantique ou par le contexte spatial.

III. 2. 1. Minimisation du nombre de relations en utilisant la sémantique

L'analyse de la sémantique a besoin d'une méthode d'interprétation qui doit prendre en compte la sémantique des objets. Par exemple, dans la figure III. 3, le bureau de poste est de type spécifique par rapport aux autres objets (des maisons), il peut être ainsi considéré comme point de référence sémantique.

Figure III. 3. Capture de Google-Maps d'une zone de voisinage d'un bureau de poste (Ramonville Saint-Agne 31)

Par exemple la maison *A* est la plus proche de la Poste, la maison *C* est à l'est de la

Poste, etc. Ce type de positionnement est souvent utilisé dans la vie quotidienne. Partant de ce principe, nous pouvons garder uniquement les relations qui relient les maisons au bureau de poste tout en éliminant les autres relations (inter-maisons)

Malheureusement, il est difficile (voire impossible parfois) de déduire de telles relations sémantiques à partir d'une configuration spatiale. Par conséquent il est trop difficile d'utiliser cette méthode pour simplifier le nombre de relations dans un graphe.

III. 2. 2. Minimisation du nombre de relations en utilisant le contexte spatial

L'utilisation du contexte spatial n'exige que des connaissances sur la géométrie des objets. Par conséquent, il est moins difficile à intégrer et plus adapté pour déterminer l'importance d'une relation. Si le mécanisme d'analyse du contexte spatial est basé sur la proximité, la première loi de Tobler [Tobler 1970] peut être employée. Cette loi stipule que « tout est lié à tout mais les choses proches sont les plus liées ».

En effet, le nombre de relations dépend de la méthode utilisée pour définir la proximité des objets. Toutefois, ce nombre est sans doute inférieur au nombre de relations dans le graphe complet, parce que les relations entre les objets proches sont seules prises en compte.

III. 2. 3. Discussion sur les méthodes de simplification du graphe

Dans les sections précédentes, nous nous sommes intéressés à la réduction du nombre de relations pour simplifier un graphe. Nous n'avons pas abordé la possibilité de réduire le nombre des nœuds pour atteindre cet objectif. Cette solution se base sur l'application de filtres qui ne gardent que les objets importants. Ces filtres utilisent plusieurs paramètres, tels que la distribution des objets, les tailles, les contextes. Avec cette approche, l'efficacité augmente en $O(n^2)$, car pour chaque objet éliminé, $n-1$ arêtes seront supprimées. Cependant cette approche peut exclure des objets qui sont importants pour la sémantique de la scène. En effet, l'importance d'un objet est subjective et différente d'un utilisateur à l'autre.

La simplification du nombre de relations peut être assurée selon deux méthodes : une première méthode se base sur la sémantique des liens entre les nœuds. La deuxième méthode prend en compte le contexte spatial entre les deux extrémités d'une relation. Nous avons montré que seule l'utilisation de la deuxième approche est envisageable pour diminuer le nombre de relations dans un graphe. Cette approche sera davantage détaillée dans la suite de ce chapitre.

III. 3. Modèle de données géographiques

Les données géographiques ont des structures complexes. Elles sont présentées sous différents formats et selon différentes échelles. En effet, l'utilisateur peut demander des informations d'un type particulier ou selon une échelle précise. Par exemple, il peut s'intéresser seulement aux réseaux routiers comme il peut formuler sa requête pour récupérer des informations situées dans une région particulière. Pour cela nous devons organiser ces données afin de permettre aux utilisateurs d'interroger les bases selon ces deux critères de recherche.

À cette fin, nous proposons de rassembler les objets en différents niveaux en se basant sur leur type et leur taille. Cette organisation permettra l'interrogation de la base selon un seul niveau ou d'en combiner plusieurs.

Dans la première couche, nous mettons les objets qui appartiennent aux réseaux géographiques. Chaque réseau se compose d'un ensemble de lignes connectées. Les autres couches contiennent les objets qui représentent les régions. À ce niveau, afin de refléter la notion d'échelle, nous limitons le plus possible les relations d'inclusions entre les régions. Pour ce faire, ces objets seront regroupés en plusieurs couches en fonctions de leur taille. En effet, nous créons une nouvelle couche si parmi la liste des objets qui composent une configuration spatiale, nous trouvons au moins deux objets obj_1, obj_2, de taille respectivement t_1, t_2 et qui ont une distance $D > 1$ donnée par l'équation [2].

$$D = \frac{|t_1 - t_2|}{min\,(t_1, t_2)} \qquad [2]$$

Sinon, nous considérons que tous les objets ont à peu près la même taille et nous aurons ainsi une seule couche.

Nous allons traiter chaque couche séparément afin de permettre la formulation des requêtes selon un type ou une échelle précise. Ensuite, nous construirons un modèle qui regroupe les résultats obtenus pour chaque couche afin d'être en mesure de traiter une requête combinée (multi-échelles et/ou multi-types).

III. 3. 1. Modèle de réseau géographique

Les réseaux géographiques représentent un type de données important. Ils peuvent être utilisés par de nombreuses applications (par exemple, le transport, l'hydrologie, etc.). Nous présentons dans un premier temps un ensemble des contraintes pour les composants de ce type de réseau, qui sont nécessaires pour former un réseau valide.

Définition 1 : une ligne ouverte est une séquence continue de points non intersectés dans $\mathbb{R}^2$. Elle peut être représentée par la fonction injective *l* continue (équation [3]).

$$l : [0 , 1] \longrightarrow \mathbb{R}^2 \qquad [3]$$

Les frontières d'une ligne sont ses deux point extrêmes $\{l_i(0), l_i(1)\}$, tandis que l'intérieur d'une ligne est formé par les autres points. La figure III. 4 montre une collection de lignes : (*a*, *b*) sont des lignes ouvertes valides tandis que (*c*, *d*) ne le sont pas. La ligne (*d*) représente une ligne fermé où $l_d(0) = l_d(1)$. La ligne (*c*) peut être simplifiée en la divisant en un ensemble de lignes ouvertes ou fermées valides.

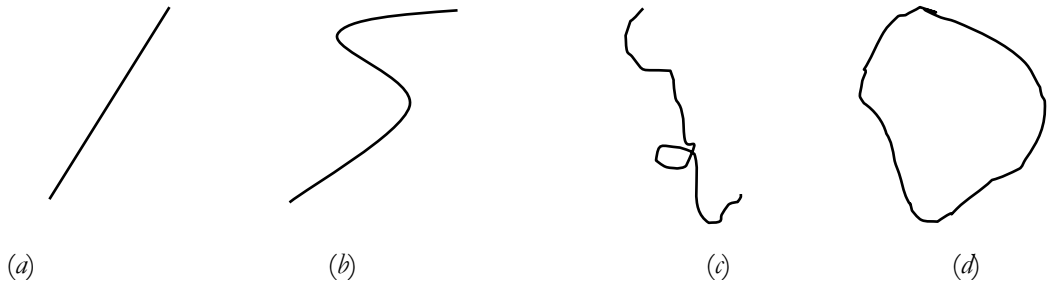


Figure III. 4. Collection de lignes

La ligne ouverte peut être une ligne droite comme (*a*), comme elle peut avoir une forme spécifique comme (*b*). Pour évaluer la similarité entre deux lignes, nous présentons les notions suivantes :

1) le nombre de détours ;
2) pour chaque détour, son degré d'inclinaison.

Pour calculer ces paramètres, nous joignons les extrémités d'une ligne l_0 par une droite l_s. Ensuite, nous comparons la longueur cette de droite avec la longueur de la ligne initiale. Selon cette différence, nous avons deux cas (ce paramètre est à définir selon la précision souhaitée, dans notre application, une série d'expérimentation nous a permis de fixer ce seuil à (6 / 5) * longueur(l_0)) :

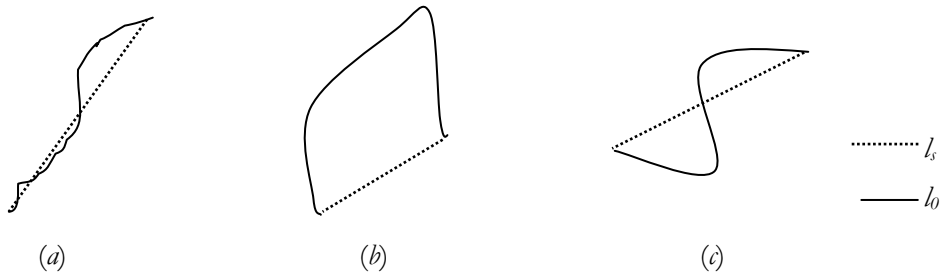


Figure III. 5. Différentes situations des lignes par rapport à la droite liant leurs extrémités

1) Si la différence est inférieure à un seuil (figure III.5 (a)), nous considérons que la ligne ne contient aucun détour et elle sera représentée par l'équation de la droite dont la pente peut être calculée en utilisant l'équation [4].

$$m = \frac{y_{ls(1)} - y_{ls(0)}}{x_{ls(1)} - x_{ls(0)}} \qquad [4]$$

2) Dans les autres cas, nous distinguons deux alternatives :

a) Si la ligne initiale ne croise pas la droite (figure III.5 (b)), nous considérons que la ligne ne contient qu'un seul détour. Pour calculer son degré d'inclinaison, nous divisons la ligne en deux selon la médiatrice de l_s. Pour chaque sous-ligne, nous joignons ses points extrêmes et nous répétons les étapes précédentes jusqu'à ce que nous atteignions l'état où la ligne peut être représentée par un ensemble de droites. La figure III. 6 montre un exemple de la façon dont une ligne est divisée. Le degré d'inclinaison est la somme des angles entre les droites. Sachant qu'un angle entre deux droites ayant respectivement des pentes m_1, m_2 peut être obtenu par l'équation [5].

$$\propto = tan^{-1}\left(\frac{m_2 - m_1}{1 + m_2 m_1}\right) \qquad [5]$$

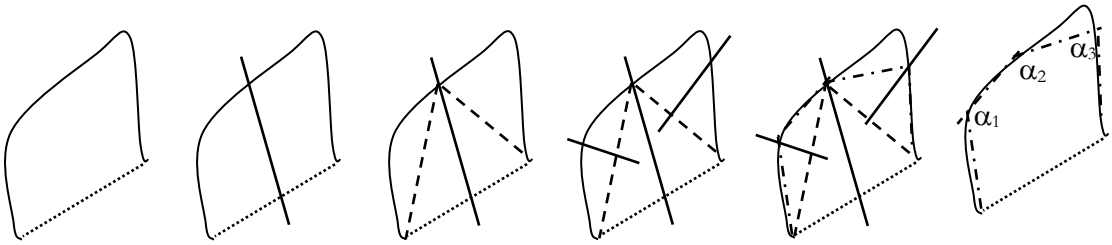


Figure III. 6. Façon de diviser une ligne

b) Si la ligne croise la droite en n_0 points (figure III.5 (c)), nous considérons que la ligne contient n_0+1 détours. Pour chaque détour nous calculons le degré d'inclinaison, tel que présenté dans la sous-section précédente. La figure III. 7 présente un exemple d'une ligne qui contient deux détours.

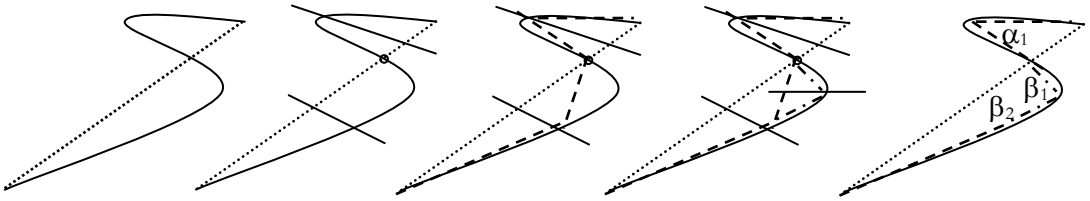


Figure III. 7. Ligne contenant deux détours

Nous présentons dans la figure III. 8 notre modèle de représentation de ligne en prenant en compte les différents cas précédents.

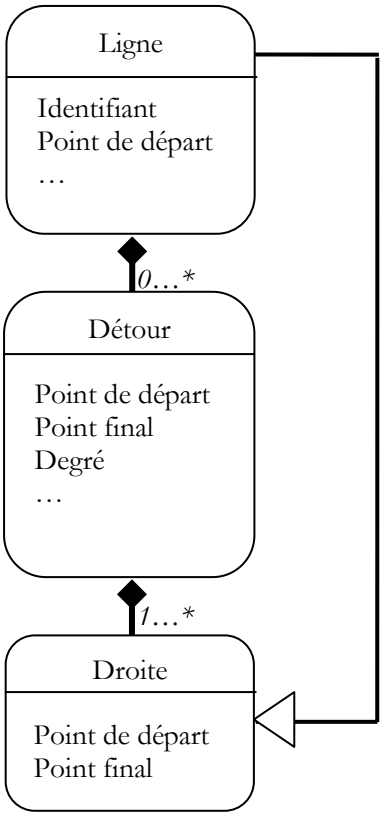


Figure III. 8. Représentation générale d'une ligne

Au fait, 33 relations topologiques peuvent exister entre deux lignes [Egenhofer et al. 1991]. Afin de simplifier cette étude, sans perte de généralité, nous considérons que deux lignes sont soit disjointes (elles ne se croisent pas) soit adjacentes (elles n'ont qu'un point de contact qui représente le croisement de leurs extrémités). Si deux lignes se croisent en un autre point (différent de leurs extrémités), elles seront divisées en de nouvelles sous-lignes vérifiant notre condition.

Définition 2 : Un réseau *R* est un ensemble de *N* lignes connectées (nous pouvons trouver au moins une chaîne de lignes adjacentes deux à deux qui couvre toute la configuration spatiale). Elles sont soit disjointes soit adjacentes en leurs extrémités. La figure III. 9 montre deux exemples de configurations, la figure III. 9 (a) représente un réseau valide selon notre définition tandis que celui présenté dans la figure III. 9 (b) ne l'est pas.

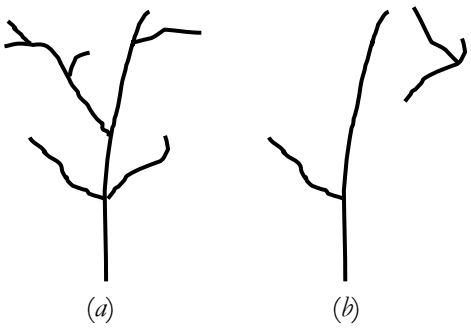


Figure III. 9. Collection de configurations géographiques

Nous appelons les points de croisement de trois lignes au moins des ***points d'intersection***. Deux lignes qui partagent une extrémité sont considérées comme une seule ligne. Autour de chaque point, les lignes peuvent être cycliquement ordonnées. Par exemple, si nous choisissons l'orientation dans le sens contraire des aiguilles d'une montre, les lignes dans la figure III. 10 peuvent être représentées par la séquence <ABCDE>.

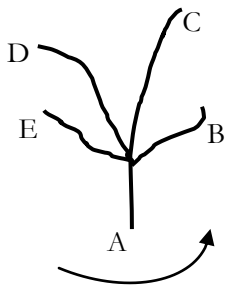


Figure III. 10. Orientation autour d'un point d'intersection

Un autre point dont il faut tenir en compte dans la construction d'un modèle adapté aux réseaux géographiques est relatif au manque dans la description donnée par l'utilisateur. En effet, il est rare que l'utilisateur se rappelle de tous les détails : il dessine ce qu'il juge important. Pour résoudre ce problème, nous avons proposé une méthode pour construire le « réseau principal » [Ghazal et al. 2008].

Au fait, le réseau principal est déduit à partir d'un réseau initial en éliminant les petits composants qui ont une probabilité d'être supprimés ou agrégés, tout en conservant sa connexité. Pour ce faire, nous ne gardons que les lignes qui relient les points d'intersection. Ensuite, nous ajoutons au résultat chaque ligne dont la longueur est supérieure ou égale à la longueur moyenne. La figure III. 11 montre un exemple de construction d'un réseau principal.

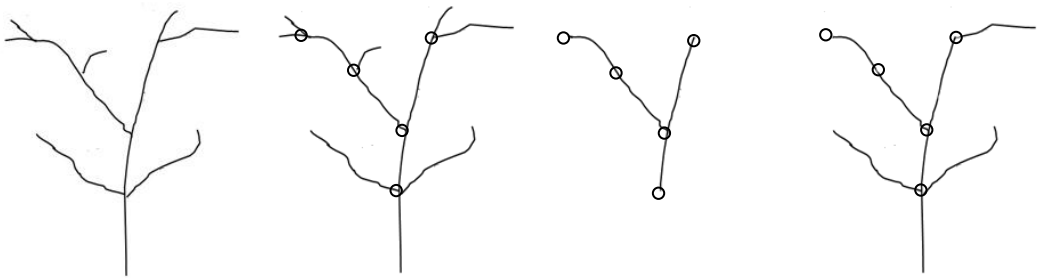


Figure III. 11. Construction d'un réseau principal

La figure III. 12 décrit le modèle que nous utilisons pour représenter les réseaux géographiques. Il montre que chaque réseau se compose d'un ensemble de points d'intersection. Chaque point doit contenir au moins trois lignes qui sont cycliquement

ordonnées. Chaque réseau est également lié à un réseau principal qui se compose à son tour d'un sous-ensemble de points et de lignes du réseau qu'il représente.

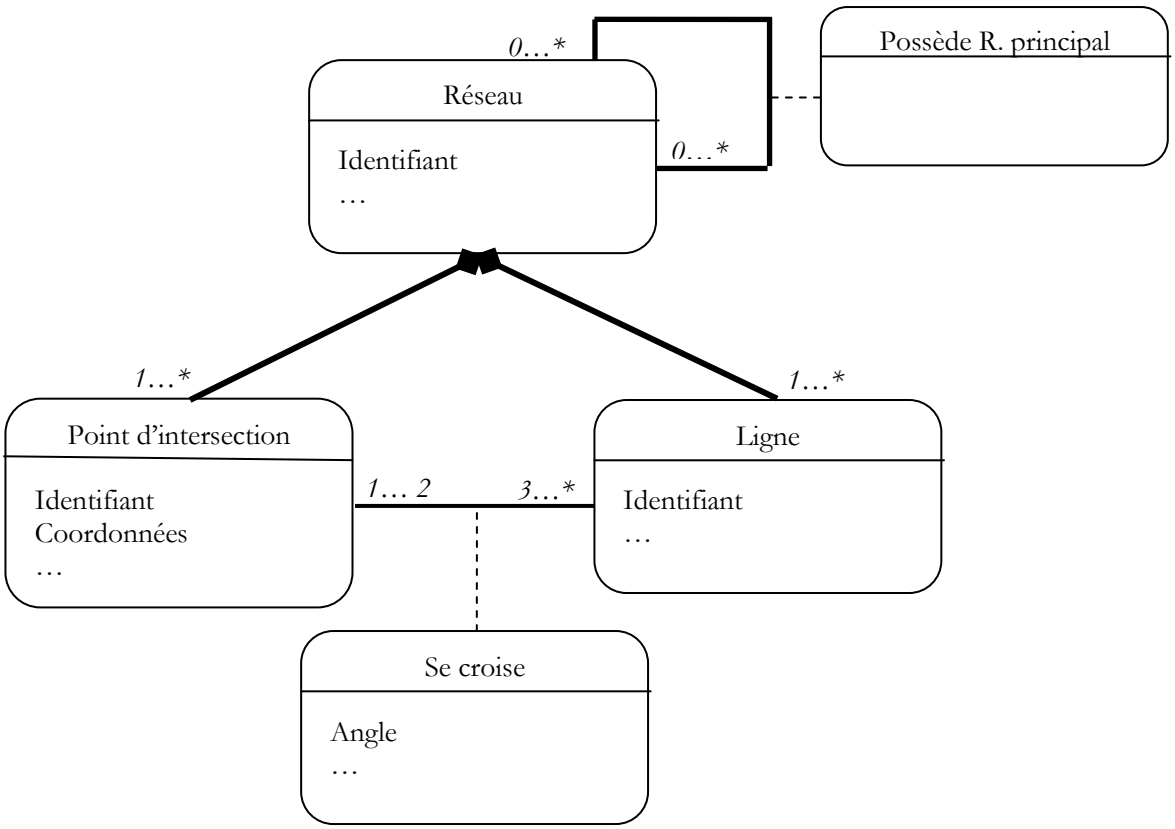


Figure III. 12. Modèle du réseau géographique

Après avoir détaillé dans cette section notre modèle des réseaux géographiques, qui présente la première couche extraite d'une configuration spatiale, nous présentons dans la section suivante notre modèle pour les autres couches.

III. 3. 2. Modèle de couche de régions

La modélisation de ces couches pose un problème qui concerne la définition implicite des relations entre les objets. C'est notre rôle de les extraire et de les représenter. Mais comme nous l'avons précédemment indiqué, chaque objet est lié à tous les autres. Une étape de sélection d'un ensemble représentatif de relations en se basant sur le contexte spatial est alors très importante. Cette étape doit mettre l'accent sur la structure générale de la configuration et donner moins d'importance aux détails. Ces derniers subissent un risque plus important d'altération et/ou de manque de précision de la part de l'utilisateur. Afin de réaliser cet objectif, nous avons proposé de rassembler les objets en un ensemble de groupes, de sorte que les groupes et les relations entre eux reflètent la structure générale de la couche en question, tandis que les structures internes des groupes reflètent les détails [Ghazal et al. 2009]. La question qui se pose alors est : comment réaliser ce regroupement ?

Au fait, ce regroupement se base directement sur la définition des voisins spatiaux de l'objet. Cette définition doit prendre principalement en compte deux points :

- l'information dans les bases de données géographiques appartient normalement à différents niveaux de résolution. Ainsi, la distance visuelle entre deux objets varie en passant d'une résolution à une autre. La distance normale ne convient donc pas pour déterminer les voisins spatiaux d'un objet. Nous proposons d'employer la distance relative qui s'adapte au changement de résolution ;
- la distance relative ne peut pas absorber l'aspect approximatif qui caractérise l'information dans la requête de l'utilisateur. À cette fin, nous utilisons la distance relative qualitative qui convient à notre objectif.

Nous présentons dans la section suivante l'algorithme qui permet de calculer ces distances et comment les utiliser pour construire le graphe de voisinage spatial.

III. 3. 2. 1. Notre démarche pour construire le graphe de voisinage spatial

Pour calculer les distances relatives qualitatives, notre algorithme se base sur une méthode de regroupement hiérarchique. Il commence par considérer chaque valeur comme une classe, puis il fusionne les classes proches successivement jusqu'à atteindre un objectif (un seuil minimum de ressemblance, un nombre maximum de classes, etc.).

La première étape consiste donc à calculer les distances entre les objets appartenant à la même couche. Une matrice symétrique de taille *n* (pour *n* objets), la matrice de distance, est obtenue. Ultérieurement, les éléments de cette matrice (les distances) sont ordonnés par ordre croissant. Ensuite, les différences entre ces valeurs prises deux à deux et la moyenne de ces différences sont calculés. Puis, chaque différence supérieure ou égale à la moyenne est considérée comme un séparateur entre deux classes. Les valeurs entre deux séparateurs seront regroupées dans une seule classe, si la longueur de l'intervalle (entre deux séparateurs) est inférieure à *L*, donnée par l'équation [6] :

$$L = \frac{Moyenne}{Ecart_moyen} \qquad [6]$$

Nous avons initialement travaillé avec une valeur de *L* égale à la moyenne des distances. Or, cette moyenne est assez sensible à l'utilisation des distances extrêmes. En effet, si on prend une même configuration et si on essaye d'isoler un seul point en l'éloignant de tous ses voisins, nous constatons une variation notable de la valeur de la moyenne. Pour atténuer l'impact de ce phénomène, nous proposons une valeur *L* qui divise la moyenne par l'écart moyen, représentant la moyenne des écarts entre chaque distance et la moyenne.

Si la longueur de l'intervalle est supérieure à *L*, des nouvelles classes seront créés pour regrouper les valeurs. À la fin de cet algorithme, nous avons une liste de classes

ordonnée. Chaque classe représente une distance relative qualitative. Nous réinitialisons la matrice de distance en remplaçant chaque distance par la classe à laquelle elle appartient. Cette nouvelle matrice forme la base pour construire le graphe du voisinage spatial.

Chaque cellule de la matrice dont la valeur appartient à la première classe est retenue. Les paires d'objets correspondant à ces cellules seront reliées par des lignes. En effet, ces lignes relient les objets proches et forment plusieurs groupes. Nous considérons chaque groupe comme un nouvel objet. La distance entre un objet G_0 (parmi les nouveaux récemment créés) et les autres x_i d'une même configuration géographique est donnée par l'équation [7]:

$$\forall x_i \notin G_0; dis(x_i, G_0) = \min\{dis(x_i, y); y \in G_0\} \qquad [7]$$

Nous remplaçons dans la matrice de distance chaque objet par le groupe auquel il appartient et les distances par les nouvelles distances. Ensuite, nous retenons dans la nouvelle matrice chaque distance dont la valeur appartient à la deuxième classe. De la même manière, les objets qui sont à cette distance seront liés. Dans cette étape de nouveaux groupes peuvent être composés d'un seul objet ; c'est le cas d'un objet qui vérifie les deux conditions suivantes :

1) avoir une distance appartenant à une deuxième classe qui le sépare d'un groupe créé durant la première étape ;
2) être assez éloigné des autres objets pour que toutes les distances qui le séparent de ces objets soient supérieures à la deuxième classe.

Nous continuons de la même manière jusqu'à ce que nous joignions tous les objets. En conclusion, nous obtenons un ensemble de groupes liés par des lignes. Pour illustrer notre méthode nous prenons l'exemple suivant.

III. 3. 2. 2. Exemple illustratif de notre démarche:

La figure III.13 (*C*) présente un sous ensemble d'une configuration spatiale (*B*), par souci de simplification. Cette configuration a été extraite à partir d'une image satellitaire (*A*) selon un traitement spécifique détaillé dans [Lopez-Ornelas et al. 2008].

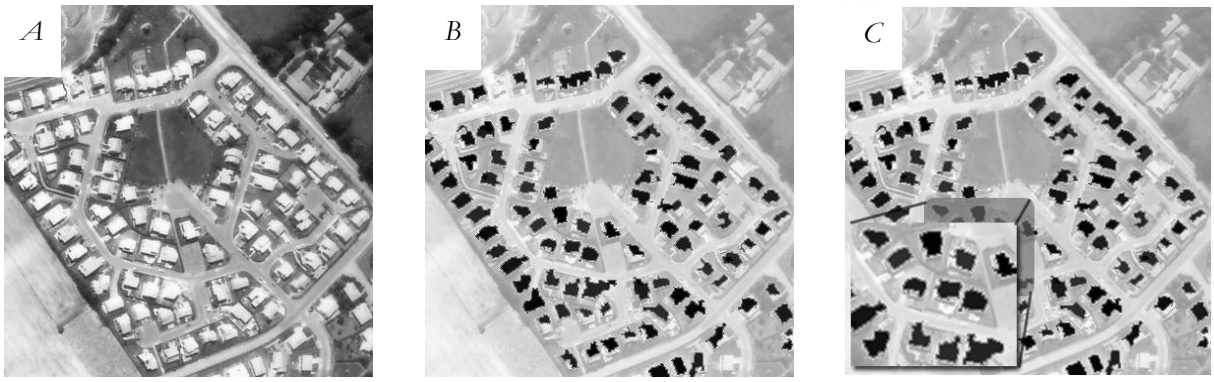


Figure III. 13. A) Image originale B) Image après le traitement C) Sous-image sélectionnée

Le sous ensemble sélectionné contient 13 objets de la même taille. Les cordonnées des centres des REM (Rectangle Englobant Minimal) de ces objets sont données dans le tableau III. 1.

	X	Y
A	2,17	1,67
B	4,16	3,07
C	6,93	1,73
D	9,67	3,14
E	12,93	3,65
F	5,45	5,38
G	8,22	5,8
H	10,51	6,83
I	1,22	7,68
J	2,31	10,25
K	5,93	9,7
L	8,56	10,8
M	10,95	10,99

Tableau III. 1. Coordonnées de centres de REM des objets

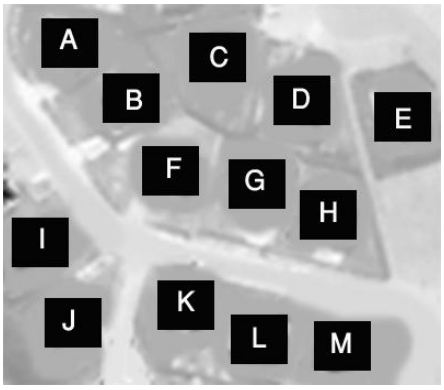


Figure III. 14. REM des objets de la scène sélectionnée

Pour établir la matrice de distance pour cette scène, nous utilisons la distance euclidienne. La matrice de distance est présentée dans le tableau III. 2.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
A	0	2,44	4,76	7,64	10,94	4,96	7,33	9,81	6,08	8,58	8,87	11,14	12,81
B		0	3,08	5,51	8,79	2,65	4,89	7,38	5,46	7,41	6,86	8,89	10,43
C			0	3,08	6,3	3,94	4,27	6,23	8,25	9,69	8,04	9,22	10,1
D				0	3,3	4,77	3,03	3,78	9,59	10,23	7,55	7,73	7,95
E					0	7,68	5,18	3,99	12,38	12,5	9,26	8,38	7,6
F						0	2,8	5,26	4,81	5,79	4,35	6,24	7,86
G							0	2,51	7,25	7,4	4,53	5,01	5,86
H								0	9,33	8,88	5,41	4,42	4,19
I									0	2,79	5,12	7,98	10,28
J										0	3,66	6,27	8,67
K											0	2,85	5,19
L												0	2,4
M													0

Tableau III. 2. Matrice de distances pour la scène sélectionnée

Parmi les 78 cellules (matrice symétrique de taille 13) du tableau III. 2, nous avons 77 valeurs différentes. Elles sont transformées en valeurs qualitatives en utilisant notre méthode de groupement, nous obtenons ainsi 25 classes : 1{(2,4), (2,44), (2,51)}, 2{(2,65)} 3{(2,79), (2,8), (2,85)}, 4{(3,03), (3,08)}, 5{(3,3)}, 6{(3,66), (3,78)}, 7{(3,94), (3,99)}, 8{(4,19), (4,27), (4,35), (4,42), (4,53)}, 9{(4,76), (4,77), (4,81), (4,89), (4,96), (5,01), (5,12), (5,18), (5,19), (5,26)}, 10 {(5,41), (5,46), (5,51)}, 11{(5,79), (5,86)}, 12{(6,08)},

13{(6,32), (6,24), (6,27), (6,3)}, 14{(6,86)}, 15{(7,25), (7,33), (7,38), (7,4), (7,41)}, 16{(7,55), (7,6), (7,64), (7,68), (7,73), (7,86), (7,95), (7,98), (8,04)}, 17{(8,25), (8,38), (8,58), (8,67), (8,79), (8,87), (8,88), (8,89)}, 18{(9,22), (9,26), (9,33)}, 19{(9,59), (9,69), (9,81)}, 20{(10,1), (10,23), (10,28)}, 21{(10,43)}, 22{(10,94)}, 23{(11,14)}, 24{(12,38), (12,5)}, 25{(12,81)}. Nous remplaçons chaque valeur par la classe à laquelle elle appartient et nous obtenons le tableau III. 3.

	A	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**	**G**	**H**	**I**	**J**	**K**	**L**	**M**
A	0	1	9	16	22	9	15	19	12	17	17	23	25
B		0	4	10	17	2	9	15	10	15	14	17	21
C			0	4	13	7	8	13	17	19	16	18	20
D				0	5	9	4	6	19	20	16	16	16
E					0	16	9	7	24	24	18	17	16
F						0	3	9	9	11	8	13	16
G							0	1	15	15	8	9	11
H								0	18	17	10	8	8
I									0	3	9	16	20
J										0	6	13	17
K											0	3	9
L												0	1
M													0

Tableau III. 3. Matrice de distances relatives qualitatives

À partir de cette matrice, nous commençons la construction du graphe en prenant toutes les cellules dont la valeur est égale à un. Chacune de ces valeurs sera représentée par une ligne (Figure III. 15). Les objets reliés seront remplacés par des groupes G1(A-B), G2(G-H), G3(L-M) et les distances entre chaque groupe et les autres objets sont calculées en utilisant l'équation [7] (Tableau III. 4).

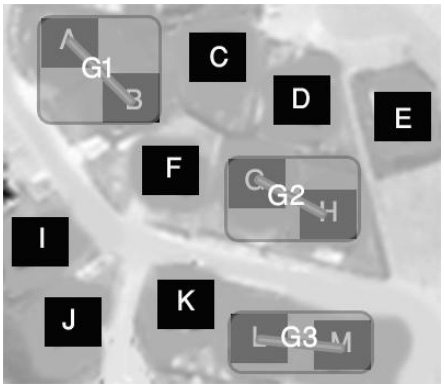


Figure III. 15. Première étape de construction du graphe de voisinage spatial

	G1	C	D	E	F	G2	I	J	K	G3
G1	0	4	10	17	2	9	10	15	14	17
C		0	4	13	7	8	17	19	16	18
D			0	5	9	4	19	20	16	16
E				0	16	7	24	24	18	16
F					0	3	9	11	8	13
G2						0	15	15	8	8
I							0	3	9	16
J								0	6	13
K									0	3
G3										0

Tableau III. 4. Matrice de distance après la première étape

Nous sélectionnons dans cette matrice toutes les cellules dont la valeur est égale à deux. Nous trouvons une seule valeur ; elle va constituer un nouveau groupe G3(F) (Figure III. 16). La matrice de distance reste la même, parce que nous n'avons qu'un groupe qui se compose d'un seul objet. Nous continuons de la même manière jusqu'à ce que nous regroupions tous les objets comme le montre la figure III. 17.

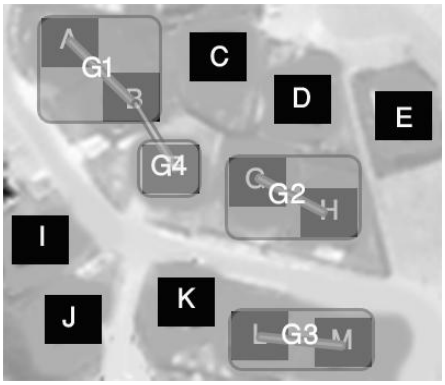
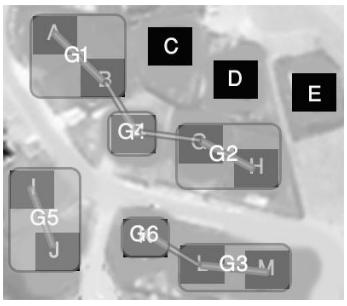
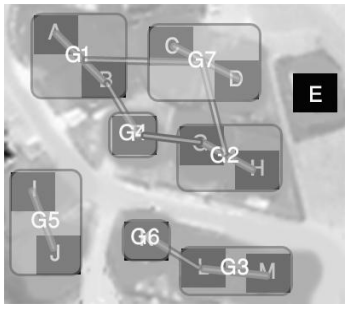


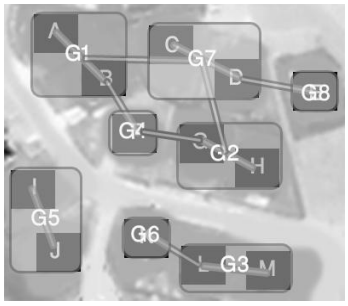
Figure III. 16. Deuxième étape de construction du graphe de voisinage



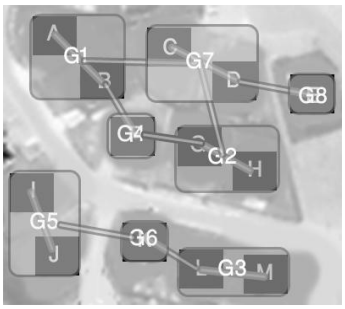
a) 3ème classe



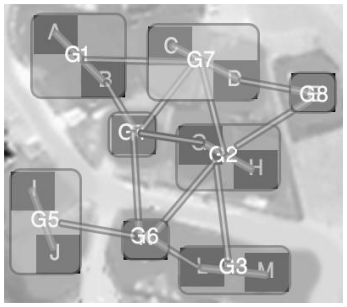
b) 4ème classe



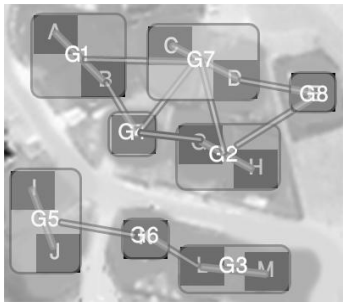
c) 5ème classe



d) 6ème classe



e) 7ème classe



f) 8ème classe

Figure III. 17. Étapes de construction du graphe de voisinage spatial

III. 3. 2. 3. Discussions

Le graphe obtenu à la fin du processus ne prend en compte que les relations entre les objets voisins. Néanmoins, l'utilisateur dessine rarement tous les objets de la scène (comme mentionné auparavant). Ce comportement pose un vrai problème pour l'interrogation ; en revenant à l'exemple précédent, supposons que l'utilisateur ne dessine pas l'objet K, par conséquent le groupe G6 n'existe pas, et le graphe de sa requête est celui présenté dans la figure III. 18.

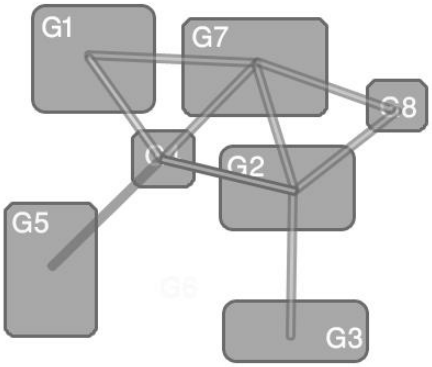


Figure III. 18. Requête de l'utilisateur sans l'objet K

Comme le groupe G5 a un seul voisin G6 dans le graphe, la suppression de G6 implique la construction d'une nouvelle ligne entre G5 et G4 qui n'existe pas dans la configuration originale. Par conséquent, nous n'aurons pas la configuration souhaitée dans les résultats de la requête. Pour surmonter ce problème nous proposons de renforcer les relations entre les groupes pour les données de la base, afin que chaque groupe soit lié à au moins deux autres groupes. En revenant à l'exemple précédent, seul G5 a un seul voisin, en prenant les cellules dont la valeur est égale à neuf (la dernière étape était avec la 8ème classe), nous pouvons renforcer la connexité du graphe. Ainsi nous pouvons apparier la représentation de la requête (Figures III. 18) et celle de la base (Figure III. 19).

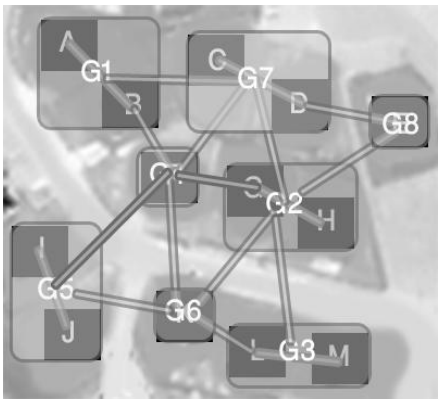


Figure III. 19. Graphe de voisinage après l'étape de renforcement

À la fin de l'étape précédente, nous avons un ensemble de groupes. Les objets d'un groupe sont liés entre eux par des lignes, qui appartiennent à la même classe de distances, alors que les groupes sont liés entre eux par des lignes, qui appartiennent à différentes classes. Par conséquent, nous avons distingué deux types de relations, les relations intra-groupe et les relations inter-groupes.

Pour les relations intra-groupe, nous pouvons distinguer deux cas : (1) le groupe contient un seul objet, alors nous n'avons pas de relations, (2) le groupe contient au moins deux objets, seules les relations topologiques entre ces objets sont prises en compte. En effet, les objets à ce niveau sont proches, de sorte que la connectivité et la contiguïté entre les objets ont une signification importante, tandis que les relations directionnelles sont considérées comme des détails qui peuvent facilement être modifiés.

Concernant les relations inter-groupes, seules les relations directionnelles sont prises en compte (puisqu'elles reflètent la structure générale d'une configuration et les objets sont généralement disjoints dans ce cas). Nous rappelons que les relations métriques sont implicitement prises en compte dans la construction du graphe.

La figure III. 20 représente notre modélisation de couche des régions. Elle montre que chaque couche se compose d'un ensemble de groupes qui sont en relation de voisinage entre eux. En effet, les voisins d'un groupe sont cycliquement ordonnés. Chaque groupe contient au moins un objet. Pour chaque objet, on enregistre le nombre de ses voisins (les objets qui partagent une arête avec cet objet), et la nature de la relation topologique avec chaque voisin.

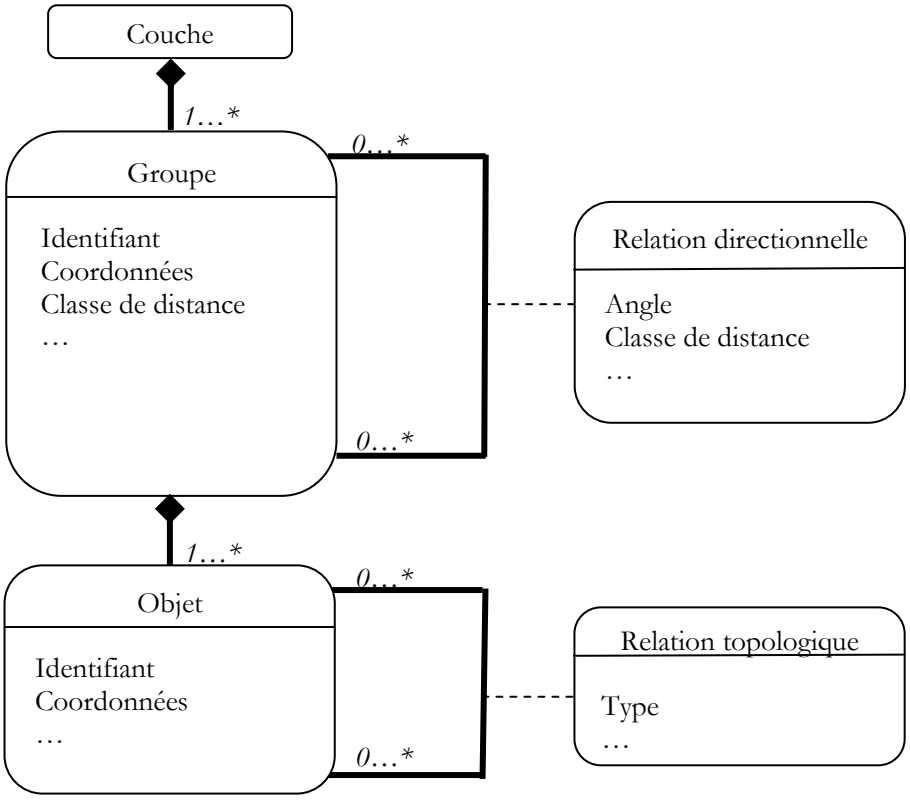


Figure III. 20. Modèle de couche des régions

Après avoir présenté dans cette section nos modèles pour les différentes couches, nous abordons dans la suite l'évaluation de la similarité entre deux configurations.

III. 4. Méthodes d'appariement et mesures de similarité

Le processus d'appariement permet de mettre en correspondance des ensembles d'objets, c'est-à-dire des objets qui représentent la même réalité [Walter et al. 1999]. Il s'appuie sur la notion de similarité, c'est-à-dire que deux objets géographiques *A* et *B* appartenant à des bases de données géographiques différentes sont appariés s'ils se ressemblent.

A première vue, la similarité paraît facile à définir à travers des règles basées sur les différentes propriétés des objets géographiques (forme, type, relation spatiale, etc.). Cependant, la spécificité des données géographiques fait que cette déduction n'est pas immédiate et qu'elle est très complexe à définir dans le pratique. Dans cette section, nous présentons des méthodes d'appariement et des mesures de similarité en se basant sur nos modèles détaillés précédemment.

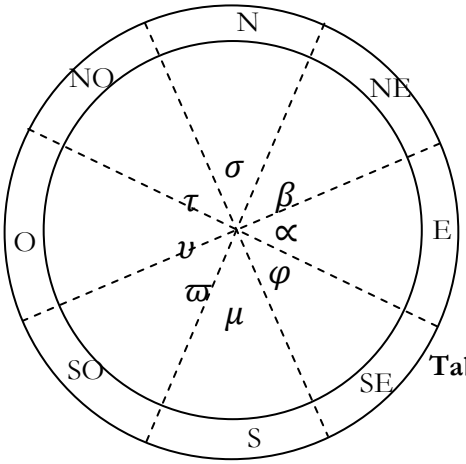
III. 4. 1. Méthode d'appariement et mesures de similarité pour les réseaux géographiques

Comme nous avons présenté en section III. 3, chaque réseau se compose de lignes liées par des points d'intersection. Les réseaux identiques ont forcement le même nombre de composants. Cette condition peut ne pas être vérifiée pour les réseaux similaires. En ce qui concerne notre recherche d'interrogation par croquis, d'autres points doivent être pris en compte :

- l'approximation de l'information : il est presque impossible qu'un utilisateur dessine un croquis parfaitement identique à une configuration spatiale stockée dans une base de données, même s'il se rappelle de tous les détails (les longueurs des lignes et les angles entre elles) ;
- une résolution différente : l'utilisateur dessine son croquis en fonction de l'espace dont il dispose pour dessiner sans que la résolution d'information existant dans la base soit décombrant pour lui ;
- pour les réseaux similaires (mais pas identiques), l'utilisateur ne dessine que les lignes importantes, ce qui implique également la suppression de certains points d'intersection. C'est pour cette raison que nous avons proposé l'utilisation du réseau principal.

Afin de résoudre le problème de l'imprécision, nous avons utilisé des critères qualitatifs pour représenter les longueurs de lignes et les angles entre elles. Le problème du changement des longueurs de lignes en fonction de la résolution peut être résolu en utilisant les longueurs relatives.

Pour avoir la longueur relative qualitative, nous nous basons sur la méthode de groupement hiérarchique utilisée précédemment. La représentation qualitative des angles se base sur la division du cercle trigonométrique (4 angles droits) en *n* angles (dans notre étude = 8, la division traditionnelle de l'espace géographique : nord, nord-est, nord-ouest, etc.). Cette représentation est détaillée dans la figure III. 21 et le tableau III. 5.



Angle qualitatif	Angle quantitatif
∝	$2\pi-\pi/8 \leq \theta \leq \pi/8$
β	$\pi/8 \leq \theta \leq 3\pi/8$
σ	$3\pi/8 \leq \theta \leq 5\pi/8$
τ	$5\pi/8 \leq \theta \leq 7\pi/8$
υ	$7\pi/8 \leq \theta \leq 9\pi/8$
ϖ	$9\pi/8 \leq \theta \leq 11\pi/8$
μ	$11\pi/8 \leq \theta \leq 13\pi/8$
φ	$13\pi/8 \leq \theta \leq 15\pi/8$

Tableau III. 5. Angles qualitatifs vs. Angles quantitatifs

Figure III. 21. Division du plein cercle en 8 angles

Après l'adaptation de notre modèle avec le changement de résolution, et la modification de la représentation afin d'absorber l'approximation de l'information, nous distinguons deux types d'interrogation :

- les réseaux presque identiques : deux réseaux qui ont le même nombre de composants (lignes et points d'intersection). Seuls les longueurs et les angles entre les composants sont légèrement différents ;
- les réseaux similaires : quelques composants sont éliminés ou agrégés sans changer la structure générale des réseaux.

Bien évidemment, le deuxième cas est plus général que le premier mais son processus d'appariement est plus complexe et il implique beaucoup de bruit non souhaitable dans le résultat. C'est à l'utilisateur de choisir la méthode d'appariement en fonction de ses informations.

III. 4. 1. 1. Réseaux presque identiques

Afin de faire l'appariement dans ce cas, nous attachons à chaque point d'intersection un poids qui est la somme des longueurs des lignes qui se croisent en ce point. Ensuite, nous prenons dans chaque réseau le point d'intersection qui a le poids le plus important (en cas de réseaux identiques ces deux points doivent avoir le même nombre de lignes). Si cette condition est vérifiée, les points d'intersection qui ont une ligne directe avec les premiers sont comparés en prenant en compte l'ordre (des aiguilles d'une montre) cyclique (les analogues doivent avoir le même nombre de lignes). Nous continuons de la même manière jusqu'à apparier tous les points d'intersection. S'il est impossible de trouver cette ressemblance, les deux réseaux peuvent être similaires mais ils ne sont pas presque identiques. Sinon, le degré de similarité peut être calculé en comparant les angles et les classes des longueurs pour les composants analogues. Le degré peut être donné par l'équation [8]:

$$S = \lambda\, S_l + \rho\, S_a \qquad [8]$$

Sachant que S_l représente la similitude entre les lignes, S_a représente la similitude entre les angles et λ, ρ sont des varaibles à définir selon la pondération que nous souhaitons donner à chacun de ces deux paramétres (dans notre application elles sont égales à 0,5 : nous considérons les S_a et S_l ont le même poids dans la processus d'évaluation de similarité globale). Si nous avons deux réseaux qui ont *n* lignes regroupées en *k* classes et *m* angles, S_l et S_a peuvent être respectivement représentés par les équations [9] et [10] :

$$S_l = 1 - \sum_{i=1}^{n} \frac{\Delta_i}{n*k} \text{ et } \Delta_i = \begin{cases} 0 \text{ si } |x_i - x'_i| \leq 1 \\ |x_i - x'_i| \text{ sinon} \end{cases} \quad [9]$$

$$S_a = 1 - \sum_{i=1}^{m} \frac{\delta_i}{8*m} \text{ et } \delta_i = \begin{cases} 0 \text{ si } |\theta_i - \theta'_i| \leq 1 \\ |\theta_i - \theta'_i| \text{ sinon} \end{cases} \quad [10]$$

avec Δ_i la différence entre la classe de longueur de la ligne x_i et son analogue x'_i et δ_i la différence entre un angle qualitatif θ_i et son analogue θ'_i. L'exemple suivant montre la procédure de calcul de la similarité entre deux réseaux (*a*), (*b*). Le deuxième réseau est obtenu en appliquant deux modifications sur la première (changement d'échelle et rotation).

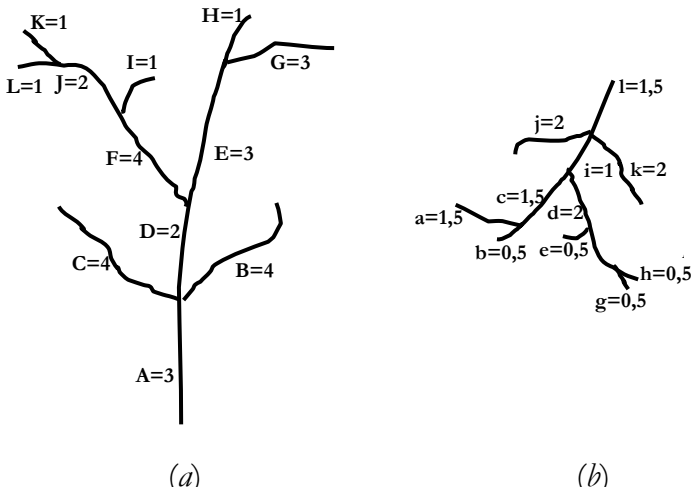


Figure III. 22. Réseau à deux échelles différentes

Le réseau dans la figure III. 22 (a) est représenté en utilisant ses points d'intersection comme suit : {ABDC}(13, τ, β, σ, σ), {DEF}(9, υ, β, τ), {EGH}(7, σ, β, υ), {FIJ}(7, σ, σ, υ), {JKL}(4, τ, β, σ). Les longueurs des lignes sont 1, 2, 3, 4. La différence entre ces valeurs est égale à 1, la moyenne de ces différences est est donc égale à 1 donc nous aurons 4 classes T(1), X(2), Y(3), Z(4).

Le réseau dans la figure III. 22 (b) est représenté en utilisant ses points d'intersection comme suit : {abc}(3.5, β, υ, σ), {cdi}(4.5, β, τ, σ), {def}(3.5, σ, σ, υ), {fgh}(2, τ, β, σ), {iklj}(6.5, σ, σ, τ, β). Les longueurs des lignes sont 0.5, 1, 1.5, 2. La

différence entre ces valeurs est égale à 0.5, la moyenne de ces différences est aussi égale à 0.5 donc nous aurons 4 classes T(0,5), X(1), Y(1,5), Z(2).

Le point d'intersection qui a le poids le plus important dans le réseau (*a*) est {ABDC} qui a quatre lignes. Son analogue dans le deuxième réseau (*b*) est {iklj} qui a également quatre lignes. Nous continuons donc en prenant les points d'intersection qui ont une connexion directe avec ces points (ils présentent les extrémités d'une même ligne), {DEF} du premier et {icd} du second. Tous les deux ont trois lignes. De la même manière, nous arrivons à apparier tous les points d'intersection et nous obtenons deux arbres présentés en figure III. 23 :

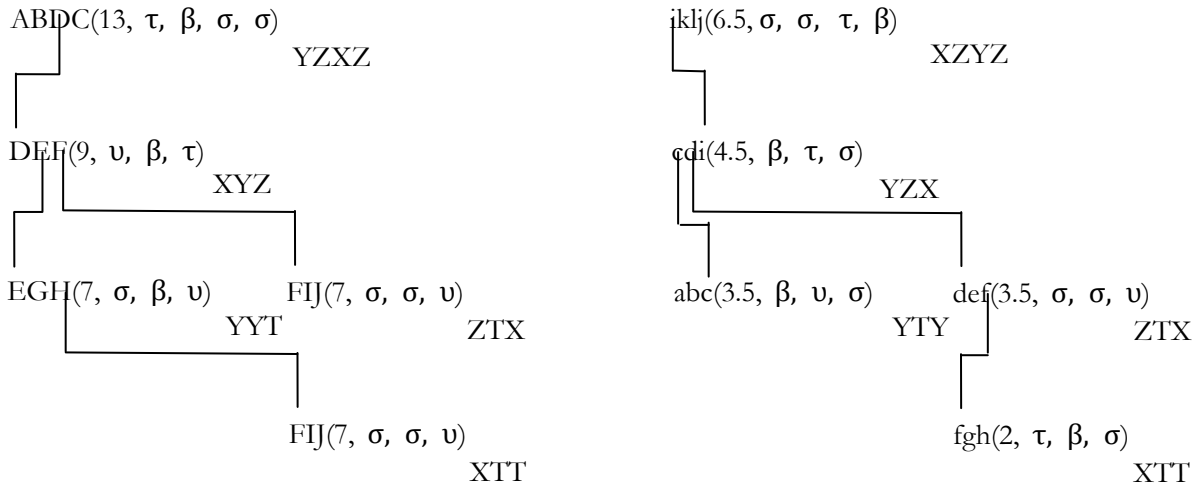


Figure III. 23. Deux arbres obtenus à la fin du processus d'appariement

En utilisant ces arbres, nous pouvons apparier les lignes. Par exemple, la ligne *i* est l'analogue de *D* puisqu'elle fait la connexion entre le premier point d'intersection (qui a le poids le plus important) et le deuxième point. En appliquant l'équation [9] et [10], nous obtenons $S_l = 1$ et $S_a = 1$, et le degré de similarité $S = 1$.

Si nous ne pouvons pas faire l'appariement selon cette méthode, cela ne signifie pas que les deux réseaux sont différents, mais seulement qu'un composant dans un des réseaux n'a, peut être, pas d'analogue dans le deuxième. Dans la section suivante nous présenterons la méthode d'appariement pour les réseaux similaires qui traite ces situations.

III. 4. 1. 2. Réseaux similaires

Les réseaux similaires n'ont pas nécessairement le même nombre de composants. Faire l'appariement dans cette situation est plus complexe parce que certains éléments peuvent disparaître ou être agrégés. Nous proposons une méthode basée sur la construction du réseau principal.

Après l'extraction des réseaux principaux, trois cas différents peuvent se présenter :

- les deux réseaux principaux ont le même nombre de composants : nous pouvons faire l'appariement selon la méthode précédente ;
- les deux réseaux principaux n'ont pas le même nombre de composants, mais chacun d'eux a au moins un point d'intersection : nous faisons l'appariement en utilisant les séquences d'angles dans les deux réseaux principaux. Le problème est que quelques composants peuvent être supprimés, l'ordre des angles de l'intersection peut être modifié. Avec la suppression d'une ligne du point d'intersection, les deux angles constitués par cette ligne et leurs voisinages seront intégrés dans un angle qui est la somme des deux angles initiaux ;
- un réseau principal n'a aucun point d'intersection : nous pouvons faire l'appariement en employant les caractéristiques des lignes (le nombre de détours et des degrés d'inclinaison).

Le degré de similitude pour les deux situations précédentes est mesuré par l'équation [11], illustrée pour deux réseaux *A, B* qui ont respectivement *n, m* lignes et *t* lignes en commun :

$$S = \frac{1}{2}\left(\frac{\sum_{j=1}^{t} K_j}{\sum_{i=1}^{n} S_{Ai}} + \frac{\sum_{j=1}^{t} L_j}{\sum_{i=1}^{m} S_{Bi}}\right) \qquad [11]$$

$(\sum_{j=1}^{t} K_j)$ et $(\sum_{j=1}^{t} L_j)$ présentent respectivement la somme des longueurs des lignes des réseau *A* et *B* qui ont une image dans l'autre réseau. $(\sum_{i=1}^{n} S_{Ai})$ et $(\sum_{i=1}^{m} S_{Bi})$ présentent respectivement la somme de longueurs de toutes les lignes des réseaux *A* et *B*. L'exemple suivant montre comment faire l'appariement entre deux réseaux similaires et la procédure de calcul de similarité entre eux.

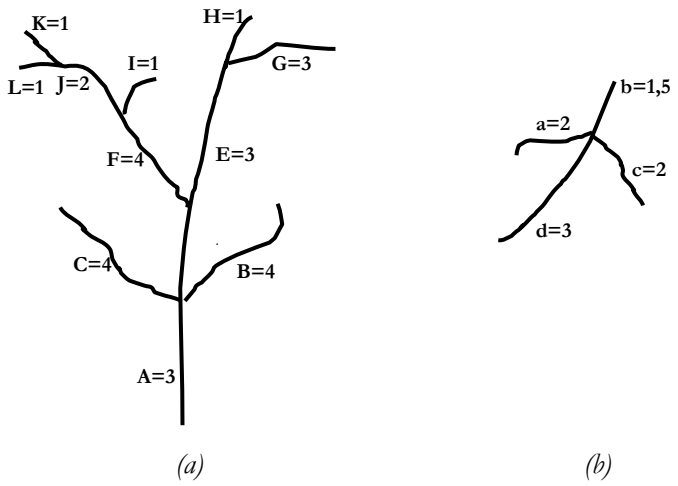


Figure III. 24. Deux réseaux similaires

Le réseau dans la figure III. 24 (a) contient 5 points d'intersection et 12 lignes tandis que 1 point d'intersection et 4 lignes forment le réseau de la figure III. 24 (b). Comme les deux réseaux n'ont pas le même nombre de composants, nous essayons de faire l'appariement suite à l'extraction des réseaux principaux. La longueur moyenne pour (a) est (29/12 = 2,42) et pour (b) est (8,5/4 = 2,12) et le réseau principal de chaque configuration est présenté dans la figure III. 25.

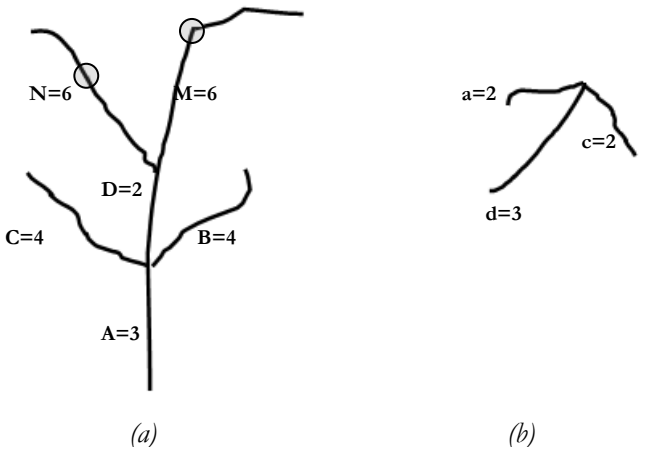


Figure III. 25. Réseaux principaux des réseaux présentés dans la figure III. 24

Le réseau principal dans la figure III. 25 (a) est représenté en utilisant ses points d'intersection comme suit : {ABDC}(13, τ, β, σ, σ), {DMN}(14, υ, β, τ). Les longueurs des lignes sont 2, 3, 4, 6. Les différences entre ces valeurs sont 1, 1, 2. La moyenne de ces différences est 1,33 et l'écart moyen est 0,44, nous aurons donc 3 classes T(2), X(3, 4), Y(6).

Le réseau principal dans la figure III. 25 (b) est représenté en utilisant son point d'intersection comme suit : {adc}(7, β, σ, ϖ). Les longueurs des lignes sont 2, 3. La différence entre ces valeurs est 1. La moyenne de ces différences est 1, nous aurons donc 2 classes T(2), X(3).

Les deux réseaux principaux n'ont pas le même nombre de composants mais tous les deux ont au moins un point d'intersection, nous essayons de faire l'appariement en utilisant les séquences des angles. En effet, nous avons un seul point d'intersection dans le deuxième réseau principal qui a trois lignes, alors que nous avons deux points d'intersection dans le premier (un a 3 lignes et l'autre 4 lignes). Nous commençons la comparaison par les deux points qui ont trois lignes ({DMN}, {adc}). Nous constatons qu'ils ont un angle en commun β et les deux autres angles sont complètement différents {(τ, υ), (σ, ϖ)}, l'appariement n'est pas possible dans ce cas. Nous essayons ensuite de faire l'appariement entre ({ABDC}, {adc}) en tenant en compte que {ABDC} a une ligne de plus. Nous remarquons qu'ils ont deux angles en commun dans le même ordre (β, σ)

et l'angle restant du second (ϖ) peut correspondre à la somme des deux angles restant du premier (τ, σ) comme l'illustre le tableau III. 6.

σ	$3\pi/8 \leq \theta \leq 5\pi/8$
τ	$5\pi/8 \leq \theta \leq 7\pi/8$
$\sigma + \tau$	$8\pi/8 \leq \theta \leq 12\pi/8$
ϖ	$9\pi/8 \leq \theta \leq 11\pi/8$

Tableau III. 6. Somme des deux angles qualitatifs

Le degré de similarité entre ces deux réseaux peut être calculé en utilisant l'équation [11] comme suit :

$$S = \frac{1}{2}\left(\frac{4+4+2}{6+6+4+4+2+3} + \frac{2+3+2}{2+3+2}\right) = 0{,}7$$

Après avoir détaillé les méthodes d'appariement et les mesures de similarité pour les réseaux géographiques, nous présentons dans la section suivante celles utilisées dans les cas des autres couches.

III. 4. 2. Méthode d'appariement et mesures de similarité pour les couches des régions

Les objets géographiques appartenant à ces couches sont représentés à travers un graphe dans notre modèle. Afin de mettre l'accent sur la structure générale, nous rassemblons les objets en un ensemble de groupes. Les groupes et les relations entre eux reflètent cette structure, tandis que la distribution des objets dans les groupes reflète les détails qui subissent un risque plus important de modification.

Les méthodes d'appariement des graphes présentées dans le deuxième chapitre sont coûteuses au niveau du temps d'exécution. Nous nous inspirons de ces méthodes pour développer une nouvelle méthode d'appariement en se basant sur notre modèle [Ghazal et al. 2010]. En effet, notre méthode se compose de deux étapes : la première concerne la comparaison au niveau des groupes, la deuxième concerne la comparaison au niveau d'objets.

Au premier niveau nous employons une technique d'arbre de recherche pour faire l'appariement. Sachant que ce type de techniques est coûteux en terme de temps, nous utilisons des informations existantes dans notre modèle afin de réduire ce temps. Pour le deuxième niveau, nous utilisons une technique basée sur l'histogramme qui est moins complexe mais qui implique une perte importante d'information. Dans la suite nous détaillons ces deux techniques.

III. 4. 2. 1. Au niveau des groupes

Afin de faire l'appariement entre un graphe représentant une requête G_R et un autre représentant une configuration de la base G_D, nous définissons les deux conditions d'appariement de groupes :

1) un groupe $g_r \in G_R$ et son analogue $g_d \in G_D$ doivent avoir la même classe de distance ;
2) le nombre de voisins d'un groupe $g_r \in G_R$ doit être inférieure ou égal au nombre de voisins de son analogue $g_d \in G_D$ (la requête de l'utilisateur doit être incluse ou égale aux résultats souhaités).

Nous définissons également le degré d'importance d'un groupe. Ce degré est lié à la distribution des objets entre et autour du groupe. En effet, la classe de distance d'un groupe reflète la distribution des objets dans ce groupe et les classes de distance de ses voisins reflètent la distribution des objets autour. Par conséquent, le degré d'importance d'un groupe G_0 ayant CG_0 comme classe de distance et qui a k voisins $\{Gv_1, \ldots, Gv_k\}$ avec leur classe de distance $\{CGv_1, \ldots, CGv_k\}$ est donnée par l'équation [12].

$$Dg_0 = \frac{\sum_{i=1}^{k} \frac{1}{CGv_i}}{CG_0} \qquad [12]$$

La première étape dans le processus d'appariement consiste à prendre le groupe le plus important d'un graphe représentant la requête G_{RC} et d'un autre représentant une configuration de la base G_{DC}. Nous appelons ces deux groupes : les groupes centraux. Dans le cas de similarité, ils doivent vérifier les conditions d'appariement mentionnées ci-dessus. Si c'est le cas, nous comparons leurs voisins en tenant en compte l'ordre cyclique de ces voisins et leurs classes de distance. Nous appliquons la même procédure sur tous les voisins de G_{DC}. Nous continuons de la même manière jusqu'à trouver un analogue pour chaque groupe de requête.

Si nous arrivons à apparier une requête avec une configuration spatiale alors les deux configurations sont similaires. Le degré de similarité S_{inter} au niveau des groupes peut être calculé en utilisant l'équation suivante :

$$S_{inter} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} Dg_i * SA_{gi} \qquad [13]$$

avec n le nombre de groupes dans le graphe de requête, Dg_i le degré d'importance du groupe G_i et SA_{gi} la similarité entre la séquence d'angles autour de G_i et son analogue dans la configuration (elle est calculée en utilisant l'équation [10]). Afin de clarifier notre idée, nous présentons l'exemple suivant (par souci de lisibilité, nous n'avons pas utilisé une configuration réelle qui risque d'avoir une représentation assez complexe).

Exemple :

Supposons qu'un utilisateur souhaite trouver la configuration représentée par le graphe G_d (figure III. 26). Il a dessiné la configuration représentée par le graphe G_R

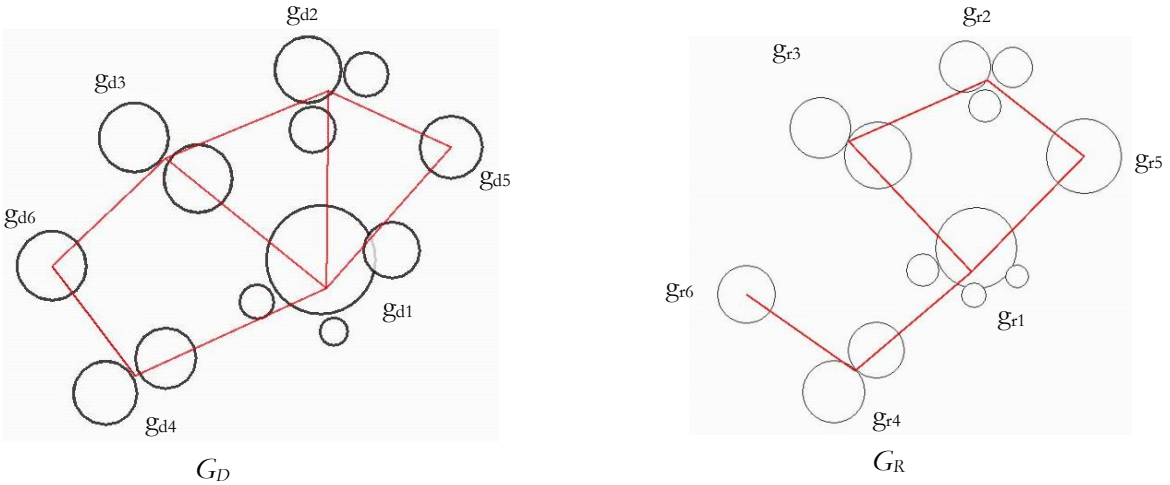


Figure III. 26. Représentation par graphe d'une requête et d'une configuration de la base

Ces configurations peuvent être représentées en utilisant le tableau III. 7 pour G_D et le tableau III. 8 pour G_R.

G_D	N. objets	Classe	N. voisin	Les voisins	Le degré
g_{d1}	4	1	4	g_{d2}, g_{d3}, g_{d4}, g_{d5}	3,33
g_{d2}	3	1	3	g_{d1}, g_{d3}, g_{d5}	2,33
g_{d3}	2	1	3	g_{d1}, g_{d2}, g_{d6}	2,2
g_{d4}	2	1	2	g_{d1}, g_{d6}	1,2
g_{d5}	1	3	2	g_{d1}, g_{d2}	0,66
g_{d6}	1	5	2	g_{d3}, g_{d4}	0,4

Tableau III. 7. Représentation de la configuration G_D de la figure III. 26

	N. objets	Classe	N. voisin	Les voisins	Le degré
g_{r1}	4	1	3	g_{r3}, g_{r4}, g_{r5}	2,33
g_{r2}	3	1	2	g_{r3}, g_{r5}	1,33
g_{r3}	2	1	2	g_{r1}, g_{r2}	2
g_{r4}	2	1	2	g_{r1}, g_{r6}	1,2
g_{r5}	1	3	2	g_{r1}, g_{r2}	0,66
g_{r6}	1	5	1	g_{r4}	0,2

Tableau III. 8. Représentation de la requête G_R de la figure III. 26

À partir de ces deux tableaux, nous pouvons remarquer que le groupe qui a le degré le plus important dans G_D est g_{d1} et dans G_R est g_{r1}. Tous les deux ont la même classe de distance et le nombre de voisins du groupe g_{r1} est 3 qui est inférieur à 4 (nombre de voisins de g_{d1}). Nous présentons dans le tableau III. 9 les possibilités d'apparier les voisins de g_{d1} et g_{r1} en tenant compte de la séquence cyclique et des classes de distance.

	g_{d2}	g_{d3}	g_{d4}	g_{d5}
g_{r3}	Oui	Oui	Non	Non
g_{r4}	Non	Oui	Oui	Non
g_{r5}	Non	Non	Non	Oui

Tableau III. 9. Possibilités d'apparier les voisins de g_{d1} avec les voisins de g_{r1}

Ce tableau montre que le groupe g_{r5} ne peut être apparié qu'avec g_{d5}, le groupe g_{r3} peut être apparié avec g_{d2}, g_{d3} et le groupe g_{r4} peut être apparié avec g_{d3}, g_{d4}.

En se basant sur le principe « retour sur trace » (cf. II. 4. 1. 1), nous allons examiner un chemin avec deux possibilités : soit nous arrivons à apparier tous les groupes, soit nous rencontrons un blocage. Dans ce dernier cas, nous faisons marche arrière pour explorer un autre chemin. Par la suite, si nous trouvons un chemin qui assure la comparaison des deux graphes jusqu'au bout, nous conclurons qu'ils sont similaires.

Nous apparions g_{r3} avec g_{d2} et nous vérifions les possibilités d'apparier les voisins de g_{r3} avec les voisins de g_{d2} (Tableau III. 10).

	g_{d1}	g_{d3}	g_{d5}
g_{r1}	Déjà	Non	Non
g_{r2}	Non	Oui	Non

Tableau III. 10. Possibilités d'apparier les voisins de g_{d2} avec les voisins de g_{r3}

D'après le tableau précédent nous constatons que le groupe g_{r2} doit être apparié avec le groupe g_{d3}. Nous vérifions les possibilités d'apparier leurs voisins (Tableau III. 11).

	g_{d1}	g_{d2}	g_{d6}
g_{r3}	Non	Déjà	Non
g_{r5}	Non	Non	Non

Tableau III. 11. Possibilités d'apparier les voisins de g_{d3} avec les voisins de g_{r2}

Le tableau III. 11 montre l'impossibilité d'apparier les voisins de g_{d3} avec les voisins de g_{r2}. Nous essayons de revenir en arrière afin de sortir de ce blocage. Notre décision d'apparier g_{r3} avec g_{d2} est fausse. Nous apparions g_{r3} avec g_{d3} et g_{r4} avec g_{d4}. Nous continuons de la même manière jusqu'à apparier tous les groupes. En utilisant l'équation [13], nous pouvons obtenir le degré de similarité entre ces deux configurations. Ce degré positif implique la similarité entre deux graphes.

$$S_{inter} = \frac{1}{6}(2{,}33 * 0{,}875 + 1 * 1{,}33 + 2 * 0{,}8125 + 1{,}2 * 1 + 0{,}66 * 1 + 0{,}2 * 0{,}75) = 1{,}167$$

Après avoir détaillé dans cette section la première partie de notre méthode d'appariement de graphe à savoir la similarité au niveau de groupes, nous abordons dans la section suivante la similarité au niveau des objets.

III. 4. 2. 2. Au niveau des objets

La distribution des objets dans les groupes a généralement moins de signification par rapport au sens total d'une configuration. Ainsi, nous proposons d'utiliser une méthode basée sur l'histogramme sans passer par l'étape d'appariement. Bien évidement, l'utilisation d'histogramme implique une perte importante d'informations, mais cette perte peut être un palliatif au manque d'information dans le croquis de l'utilisateur. Le fait d'exiger un appariement exact (au niveau des objets) pour les groupes analogues implique en effet une précision plus détaillée concernant la composition de la configuration spatiale. Ainsi, chaque « manque » dans la description va mener à une déduction de non similarité de deux graphes : avec cette méthode nous aurons un résultat strict.

Afin d'évaluer la distribution des objets entre deux groupes, nous proposons d'évaluer deux paramètres à travers deux histogrammes. Le premier montre la distribution du nombre de relations par rapports aux objets (le nombre de lignes entre un objet et les autres composants dans un groupe). Le deuxième montre la distribution de type de relations topologiques dans un groupe. Pour simplifier nous ne considérons que quatre types de relations topologiques (disjonction, adjacence, chevauchement, inclusion).

La similarité à ce niveau est la somme des similarités d'histogrammes. Elle peut être calculée en utilisant l'équation [14].

$$S_{TA} = \gamma\, S_{NR} + \partial\, S_{RT} \qquad [14]$$

S_{NR}, S_{RT} sont respectivement la similarité des histogrammes du nombre de relations et la similarité des histogrammes topologiques. γ, ∂ sont des variables à définir selon la pondération que nous souhaitons donner à chacun de ces deux paramétres (dans notre application elles sont égales à 0,5). Sachant que la similarité de deux histogrammes h_i, h_j peut être calculée en utilisant l'équation [15], avec n le nombre d'objets dans un groupe :

$$S_h = 1 - \frac{\sum_{k=1}^{n} |h_{ik} - h_{jk}|}{n} \qquad [15]$$

En revenant à l'exemple précédent, l'histogramme de l'objet G_{D1} et son analogue G_{R1} sont présentés dans la figure III. 27.

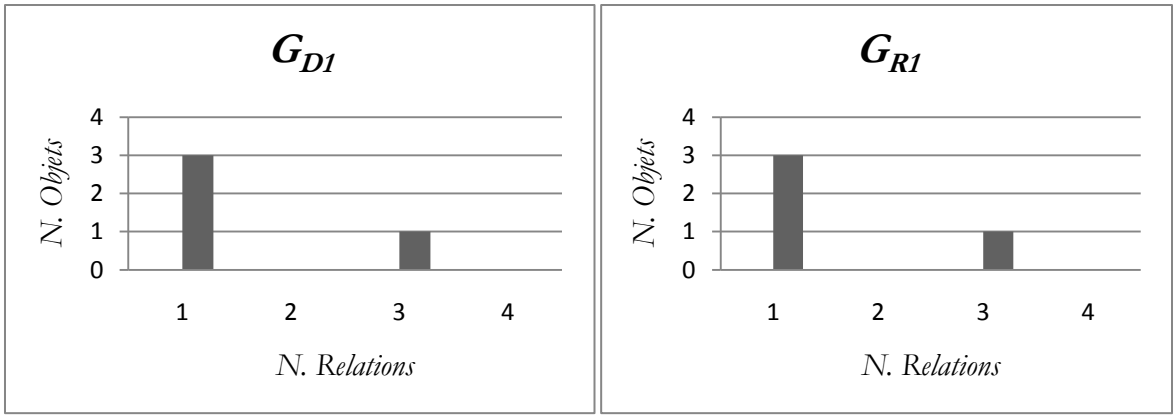


Figure III. 27. Histogramme de relations de l'objet G_{D1} et son analogue G_{R1}

Cette figure montre que l'objet G_{D1} et son analogue G_{R1} ont 3 objets ayant une seule relation et un seul objet ayant trois relations et le degré de similarité entre deux histogramme est calculé comme suit :

$$S_h = 1 - \frac{|3-3|+|0-0|+|1-1|+|0-0|}{4} = 1$$

Nous présentons dans la figure III. 28 l'histogramme topologique des mêmes objets.

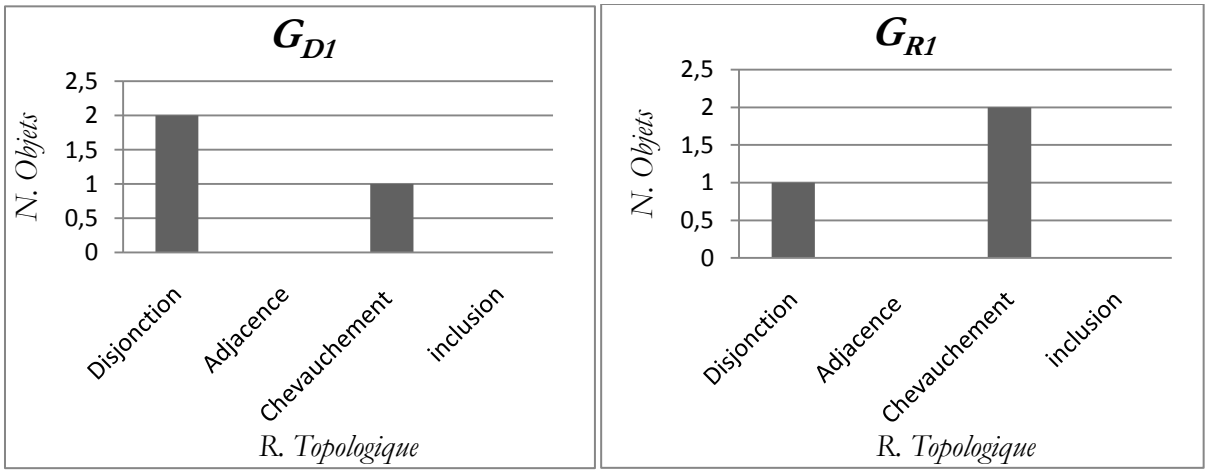


Figure III. 28. Histogramme de topologie de l'objet G_{D1} et son analogue G_{R1}

Cette figure montre que l'objet G_{D1} a deux relations de disjonction et une relation de chevauchement, tandis que son analogue G_{R1} a une relation de disjonction et deux relations de chevauchement. Le degré de similarité entre les deux histogrammes est calculé comme suit :

$$S_h = 1 - \frac{|2-1|+|0-0|+|1-2|+|0-0|}{4} = 0{,}5$$

Nous avons détaillons comment évaluer la similarité pour chaque couche séparément. La question à laquelle nous allons donner des réponses à présent est : comment trouver les résultats pertinents pour une requête multi-couches ?

III. 4. 3. Mesures de similarité pour les requêtes multi-couches

Dans le cas d'une requête multi-couches, nous commençons par calculer la similarité pour chaque couche séparément. Si nous constatons que la totalité des couches formant la requête possèdent des couches similaires dans une ou plusieurs configurations de la base, alors nous pouvons franchir la deuxième étape. Cette étape concerne le calcul de similarité entre deux superpositions de couches (celles de la requête et d'une configuration de la base).

Ces deux superpositions ne sont pas simultanées sur l'ensemble des couches. En effet, elles résultent de la superposition d'une couche avec sa couche adjacente : nous superposons les couches deux à deux.

Le calcul de similarité entre deux couches adjacentes se déroule de la manière suivante :

- nous commençons par superposer ces deux couches. Nous obtenons ainsi des points d'intersection si la première couche est formée par des réseaux ou des centres des groupes dans les autres cas ;
- pour chaque point d'intersection (ou centre de groupe) de la première couche, nous déterminons l'ensemble de *n* voisins appartenant à la deuxième couches. « *n* » est un paramètre qui varie selon la précision que nous voulons apporter à notre mesure de similarité ;
- pour chaque voisin, nous vérifions si son image appartient à l'ensemble de voisins de l'image de notre point d'intersection (ou centre de groupe) en question ;
- en fonction du nombre de voisins similaires identifiés dans l'étape précédente, nous calculons le degré de similarité d'une configuration formée par le point d'intersection (ou centre de groupe) en question avec l'ensemble de ses voisins. Ce degré est calculé selon l'équation [16] avec V_{ni} le nombre de voisins n'ayant pas d'image ;

$$S_{P2C} = 1 - \frac{V_{ni}}{n} \qquad [16]$$

- nous déterminons la similarité entre les deux couches en calculant la moyenne des valeurs que nous avons trouvées dans l'étape précédente (l'équation [17]). Avec *l* le nombre de points d'intersection (ou centre de groupes) dans la première couche :

$$S_{2C} = \frac{\sum_{i=1}^{l} S_{P2Ci}}{l} \qquad [17]$$

Enfin, la similarité globale (qui prend en compte la totalité des couches) entre la requête multi-couches de l'utilisateur et une configuration de la base sera calculée selon l'équation [18].

$$St = \zeta \frac{1}{n_c} \sum_{i=1}^{n_c} s_{ci} + \eta \frac{1}{n_c - 1} \sum_{k=1}^{n_c - 1} S_{2ck} \qquad [18]$$

avec $\sum_{i=1}^{n_c} s_{ci}$ la somme de similarité des couches séparément et $\sum_{k=1}^{n_c-1} S_{2ck}$ la somme des similarités des couches superposées deux à deux. Dans notre application, une série d'expérimentations sur le corpus utilisé nous a mené à fixer ces paramètres comme suit : n = 3, ζ = 3/4 et η =1/4.

III. 5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé le problème de la transformation de croquis vers une forme exploitable par l'ordinateur. Cette nouvelle forme prend en compte les caractéristiques importantes des données géographiques qui sont nécessaires pour ce type d'interrogation. Elle intègre également les résultats obtenus par l'étude analytique des comportements de l'utilisateur quand il dessine ses croquis.

Elle est basée sur le regroupement des objets en plusieurs niveaux en se basant sur leur type et leur taille. Cette organisation va nous permettre d'autoriser aux utilisateurs d'interroger selon un seul niveau ou d'en combiner plusieurs.

La première couche contient les objets qui appartiennent aux réseaux géographiques. Nous avons proposé un modèle qui décrit la composition du réseau en lignes et points d'intersection. Ce modèle offre notamment la possibilité d'extraire un sous ensemble de composants représentatifs qui forme le réseau principal. La notion du réseau principal a été proposée pour permettre de prendre en compte le manque d'information qui a été souvent constaté dans la requête d'utilisateur. En se basant sur ce modèle, nous avons proposé deux mesures de similarité selon le type de réseau (presque identiques et similaires).

Concernant les autres couches, un modèle basé sur la représentation par le graphe de voisinage spatial a été proposé. En effet, nous avons constaté que l'utilisation du graphe complet n'était pas adéquate pour la représentation des configurations spatiales (nombre très important des relations entre les objets). Pour surmonter ce problème, nous avons proposé de simplifier cette représentation en sélectionnant un ensemble représentatif des relations tout en gardant la totalité des objets.

Notre représentation simplifiée offre deux niveaux d'organisation :

- un premier niveau qui gère les relations entre les différents groupes formant la configuration spatiale. Ces groupes sont identifiés selon le voisinage spatial des objets basé sur la variation de distance ;
- un deuxième niveau qui gère les relations dans les groupes qui viennent d'être identifiés.

Cette dichotomie d'organisation a été illustrée dans un modèle. En se basant sur ce dernier, nous avons proposé deux mesures de similarité complémentaires :

- une mesure qui sera appliquée pour évaluer la distance de similarité entre les groupes ;
- une autre qui sera utilisée pour déterminer le niveau de ressemblance entre les objets (inter groupes).

Afin de répondre aux requêtes multi-couches qui peuvent être posées par l'utilisateur, nous avons élaboré dans la dernière section de ce chapitre une méthode qui permet de retrouver les résultats pertinents à ce type de requête.

L'ensemble des propositions décrites dans ce chapitre, modèle et démarche, a été mises en œuvre dans le cadre d'un système d'interrogation par croquis. Ce cadre applicatif nous a permis de tester, de valider et de mesurer les performances de nos approches et propositions.

Chapitre IV :
Validation : Proposition d'un outil d'interrogation par croquis

Chapitre IV : Validation : Proposition d'un outil d'interrogation par croquis 89

IV. 1. Introduction 93

IV. 2. Corpus de test 93

IV. 3. Prototype SIG-Croquis 96

IV. 3. 1. Architecture 96

IV. 3. 2. Exemples illustratifs 98

- Exemple 1 (réseau) 99
- Exemple 2 (échelle particulière) 101
- Exemple 3 (multi-couches) 103

IV. 4. Évaluation 104

IV. 4. 1. Capacité de trouver les résultats retournés par l'approche classique 105

- Corrélation de Spearman 105
- Test de rang de Wilcoxon 106
- Résultat 106

IV. 4. 2. Capacité de répondre aux requête à base de croquis 108

IV. 5. Conclusion 109

IV. 1. Introduction

Comme nous avons montré dans le chapitre précédent, un graphe réduit représentant un croquis contient moins d'informations qu'un graphe complet représentant le même croquis. Nous avons également énoncé que ce nombre réduit d'informations (selon notre méthode) est largement suffisant pour ordonner un ensemble de configurations spatiales en fonction de leur similarité avec une requête dessinée. Dans ce chapitre, nous cherchons à valider cette hypothèse. Nous cherchons également à vérifier si notre approche, basée sur l'utilisation de graphe réduit, est capable d'améliorer le résultat obtenu.

En effet, les méthodes basées sur le graphe complet n'acceptent que les changements très limités entre les configurations des images de la base et celle de la requête (rotation, changement d'échelle sans perte d'objets, etc.) et ne prennent pas en compte l'approximation de l'information fournie par l'utilisateur et le manque dans sa description. L'objectif de ce chapitre est d'apporter la preuve, à travers une approche empirique, du fait que notre approche est capable d'assurer :

- l'obtention de tous les résultats donnés par un système basé sur le graphe complet ;
- la possibilité de trouver des résultats pour un croquis dessiné par l'utilisateur (absorption du manque de précision et approximation de l'information).

À cette fin, nous présentons dans la deuxième section de ce chapitre notre corpus de test. Ce corpus est un ensemble d'images ariennes. L'architecture générale de notre prototype est détaillée avec des exemples illustratifs dans la troisième section. L'évaluation de notre prototype et les validations des hypothèses mentionnées ci-dessus sont présentées dans la dernière section de ce chapitre.

IV. 2. Corpus de test

La base d'images ayant servi à nos expérimentations a été fournie par le Centre d'Études Spatiales de la BIOsphère (CESBIO) à Toulouse (http://www.cesbio.ups-tlse.fr/). Il s'agit d'un ensemble des photos aériennes prise en mois de septembre 2004 par un avion survolant une partie de secteur est de Toulouse. Le trajet de cet avion est retracé dans la figure IV. 1.

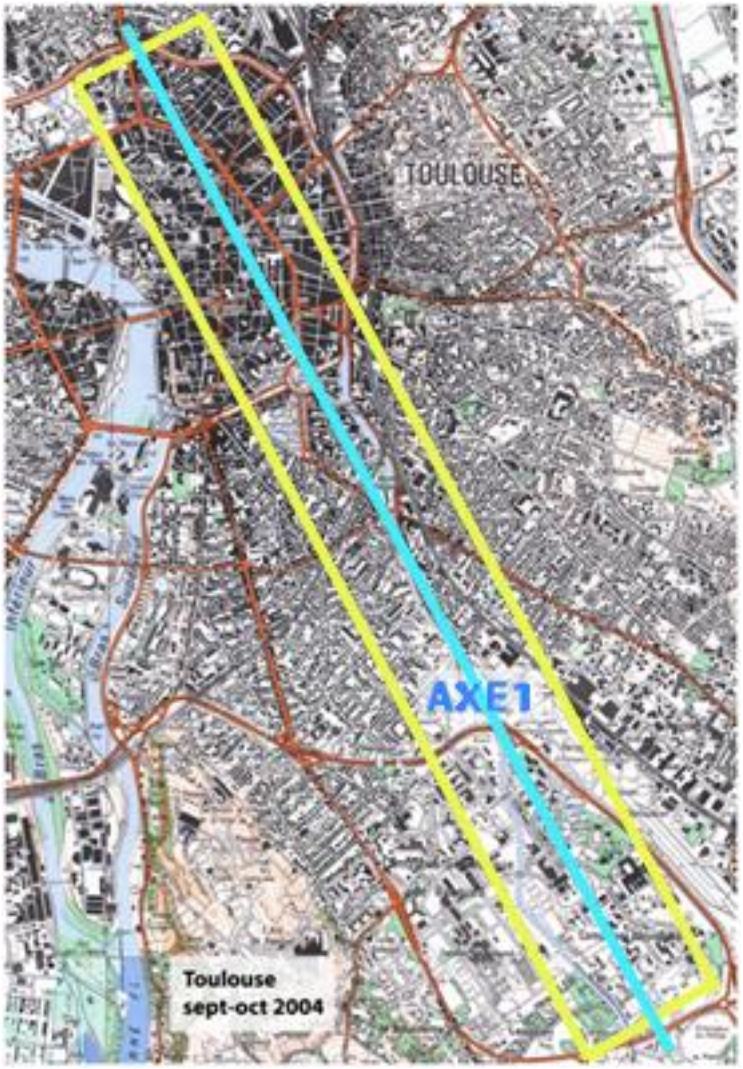


Figure IV. 1. Trajet de l'avion qui a pris les photos

Cette base contient :

- 38 images de taille 1460 x 1460 pixels. Pour ces images, un pixel couvre 0,49 m2 (0,7 * 0,7) ;
- 38 images de taille 365 x 365 pixels (chaque image de cet ensemble couvre la même zone géographique que celle d'une image du premier ensemble mais avec une résolution différente : un pixel couvre 7,84 m2 (2,8 * 2,8)).

La figure IV. 2 présente un exemple de deux images couvrant la même surface selon les deux résolutions. Nous pouvons remarquer qu'il y a des objets qui sont fusionnés et d'autres qui ont disparu en passant d'une résolution à une inférieure.

Figure IV. 2. Deux images représentant la même configuration à des résolutions différentes

Vu la grande quantité d'objets présentés dans une seule image, et puisque dans notre contexte l'utilisateur pose souvent des requêtes assez simples (ne contenant pas plus de 17 objets) nous avons opté pour la fragmentation de chaque image en 25 portions. Cette fragmentation nous permet d'obtenir des sous images contenant en moyenne 29 objets.

Pour enrichir notre base d'image et tester la robustesse de notre approche, nous avons appliqué à chaque image deux sortes de modification :

- une rotation selon un angle $\propto$ compris entre 1 et 359 degrés. Cet angle varie d'une manière arbitraire pour chaque image ;
- un zoom selon une échelle variable.

Ainsi chaque surface couverte (configuration spatiale réelle) sera présentée par six images dans notre base (selon deux résolutions et en appliquant deux techniques de modification).

En effet, à partir des 76 images (38 * 2) fournies initialement par le CESBIO et suite aux étapes de fragmentation et de modification, nous avons peuplé notre base par 5700 (76 * 25 * 3) images.

Avant de stocker une image dans la base, une étape de traitement afin d'extraire les objets et ses caractéristiques (les coordonnées du centre des REM, etc.) est nécessaire. Pour assurer ces taches nous utilisons le prototype de [López-Ornelas 2005] disponible par notre équipe de recherche.

Dans la section suivante, nous présentons le prototype SIG-Croquis qui nous permet de valider nos propositions.

IV. 3. Prototype SIG-Croquis

Afin d'apporter des preuves aux hypothèses mentionnées au début de ce chapitre, nous détaillons dans cette section la concrétisation de notre contribution au sein du prototype de recherche « SIG-Croquis ».

Ce prototype permet à l'utilisateur de formuler ses requêtes de manière graphique en griffonnant un croquis à main levée. Nous présentons dans les deux sous-sections suivantes l'architecture générale de notre prototype et ses fonctionnalités à travers un ensemble d'exemples.

IV. 3. 1. Architecture

La figure IV. 3 montre l'architecture général du prototype.

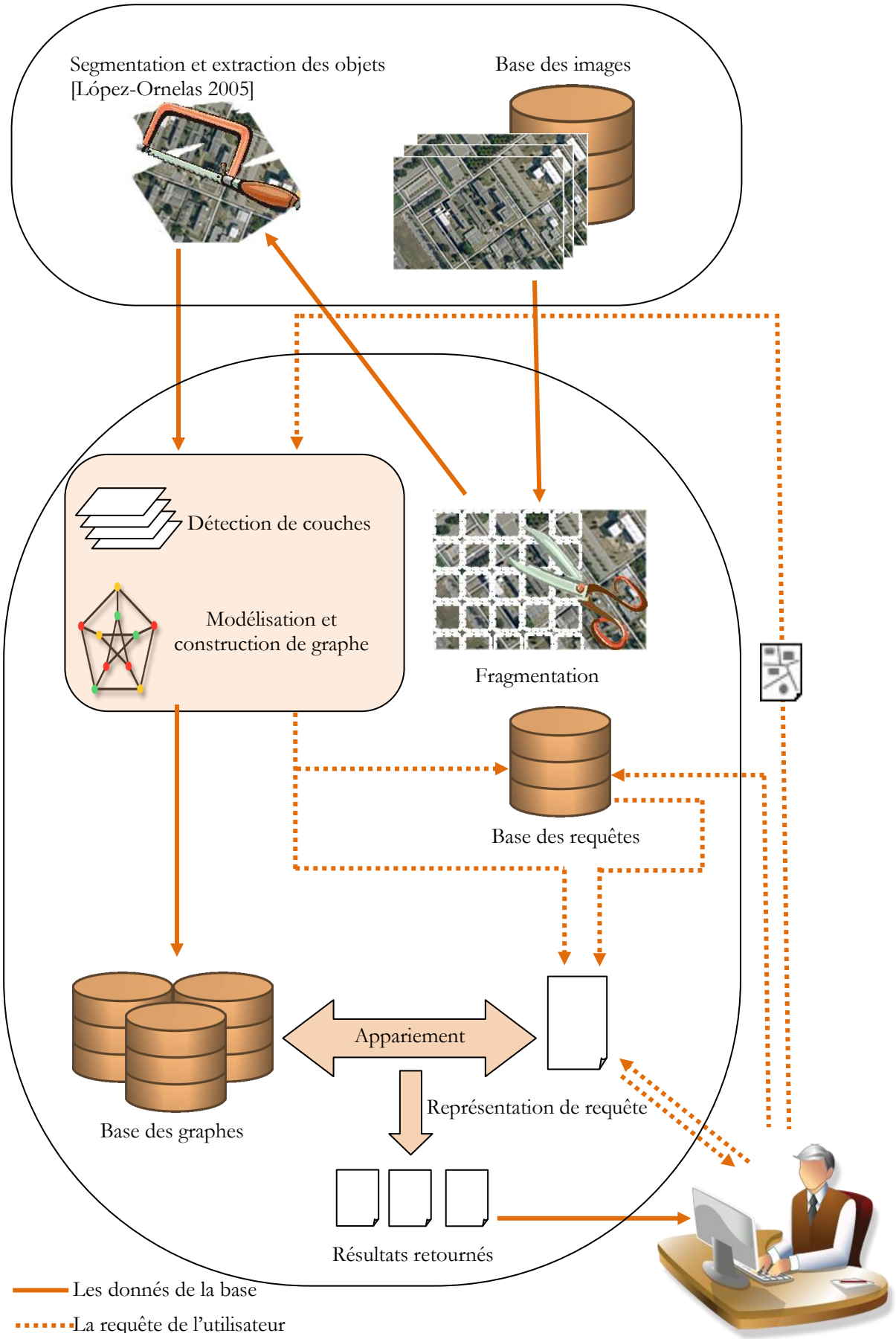


Figure IV. 3. Architecture générale de notre prototype

Notre prototype est composé de plusieurs modules interactifs. Il est en communication avec un module externe et l'utilisateur final de notre application.

Une première partie du prototype assure l'enrichissement de notre base (construite à partir du corpus détaillé dans la section précédente). Elle permet de fragmenter les images fournies en entrée pour assurer une certaine moyenne de nombre d'objets par image. Cette moyenne est fixée à 29 dans notre application.

Un module externe [López-Ornelas 2005] à notre architecture assure l'extraction des objets et de leurs caractéristiques. Les fichiers XML fournis comme résultats par ce module vont subir un traitement qui permet de :

- détecter les différentes couches (couche réseau et couches des régions) (cf. III. 3) présentées dans l'image initiale ;
- déterminer la modélisation de la couche réseau ;
- construire des graphes qui représentent les configurations spatiales des autres couches.

Les résultats de ce traitement seront stockés dans une base de données pour servir ultérieurement à la phase d'appariement.

Les requêtes posées par l'utilisateur (sous forme de croquis) vont subir le même traitement d'analyse réalisé sur les fichiers XML (fournis par le module de [López-Ornelas 2005]). Ces résultats seront présentés à l'utilisateur afin d'être validés (avec ou sans modification). Ils seront ensuite stockés dans une base de requêtes offrant ainsi à l'utilisateur un autre moyen de recherche, à partir d'une requête déjà posée.

Un processus d'appariement sera ensuite déclenché pour retrouver les configurations similaires. Ces configurations seront triées par ordre décroissant de similarité avant d'être présentées à l'utilisateur. Nous présentons dans la section suivante des exemples d'interrogation en utilisant le prototype.

IV. 3. 2. Exemples illustratifs

L'interaction entre l'utilisateur et le prototype est assurée à travers des interfaces graphiques. Ces interfaces permettent à l'utilisateur en premier lieu de dessiner les requêtes. Afin d'éviter l'ambigüité dans l'interprétation de croquis [Ferri et al. 2005], l'application demande, avant d'ajouter un nouvel objet, de déterminer son type (ligne, segment, cercle, rectangle, polygone). En effet, il est impossible de distinguer un polygone d'une ligne fermé. En outre, le prototype considère que l'utilisateur dessine chaque objet séparément pour éviter l'ambigüité dans le croisement des objets. Par exemple, quand deux rectangles se chevauchent, c'est impossible de savoir si l'utilisateur a voulu présenter deux rectangles chevauchés ou trois rectangles adjacents.

Comme nous avons mentionné dans le chapitre précédent, l'utilisateur s'intéresse à des objets à une échelle précise et/ou un type particulier. Il peut ainsi formuler une requête multi type ou multi échelle. Notre prototype détecte la nature de la requête en se basant sur les types d'objets dessinés. Pour illustrer cet enchaînement, nous détaillons le traitement de trois requêtes de nature différente :

- la première correspond à un réseau géographique ;
- la deuxième à une configuration composée des objets ayant le même type et de tailles proches (échelle specifique);
- la troisième à une requête multi-couches.

- **<u>Exemple 1 (réseau)</u>**

L'utilisateur doit choisir le type de chaque portion de son croquis, avant sa construction. Comme l'objectif de cet exemple est de rechercher des réseaux similaires, l'utilisateur va sélectionner soit le type segment (ligne droite) soit le type ligne (courbe). Une fois le croquis dessiné, l'utilisateur demande au prototype de lancer le processus de recherche. La figure IV. 4 montre un réseau géographique dessiné par l'utilisateur.

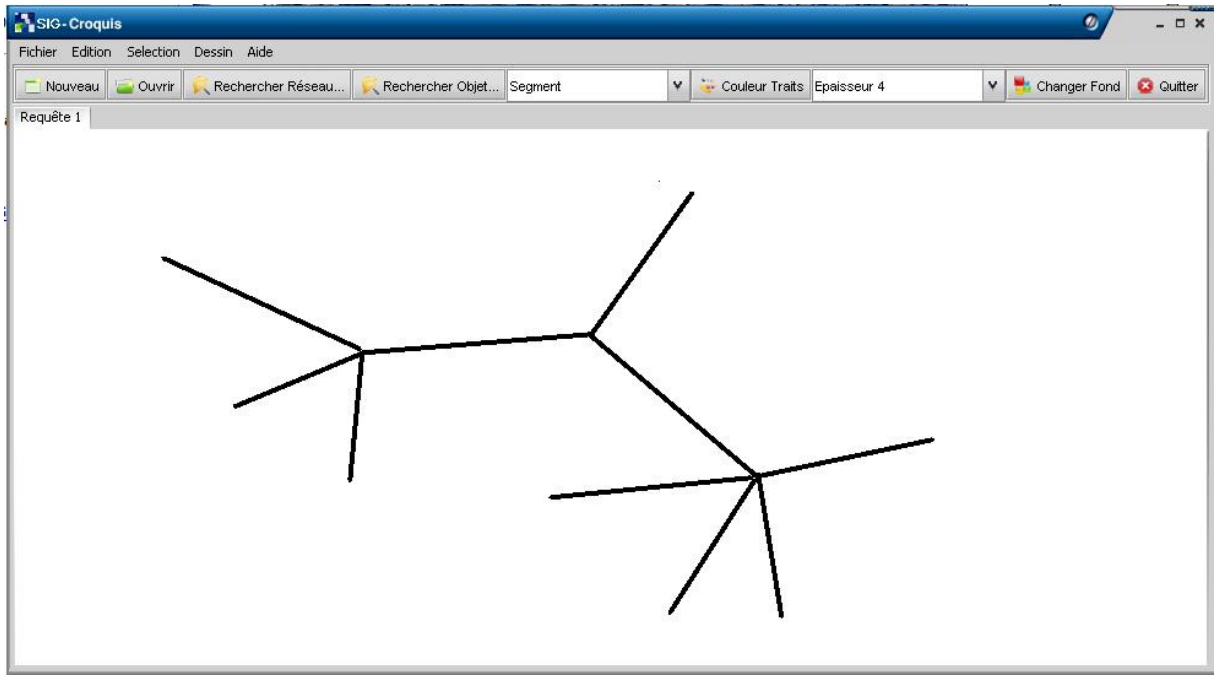


Figure IV. 4. Requête de l'utilisateur représentant un réseau géographique

L'absence d'autres types d'objet (cercle, rectangle et polygone) permet au prototype de conclure que l'utilisateur s'intéresse seulement, dans sa requête, aux réseaux géographiques. Ainsi, il vérifie la connexité du réseau dessiné. Si le réseau n'est pas valide il avertit l'utilisateur en lui demandant de corriger son croquis. La figure IV. 5 montre un exemple d'un réseau invalide qui contient un segment non connexe.

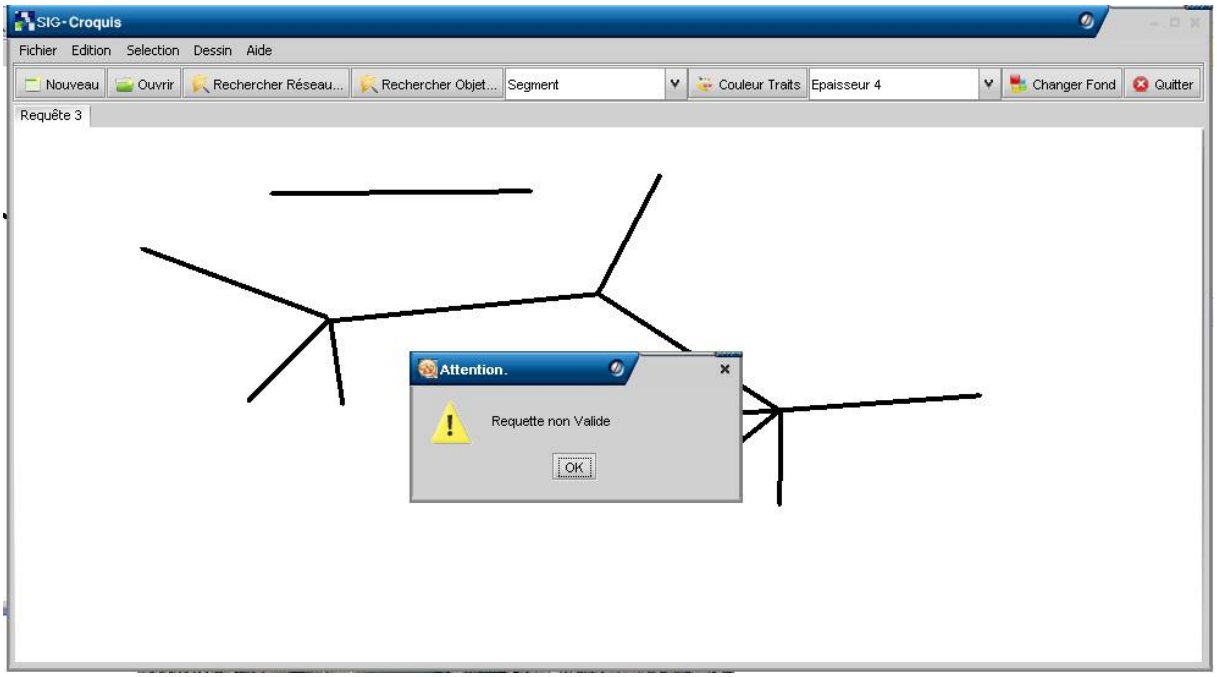


Figure IV. 5. Exemple de refus d'un réseau invalide

Dans le cas où le réseau dessiné est connecté, le prototype demande à l'utilisateur s'il souhaite enregistrer la requête pour pouvoir l'utiliser ultérieurement ou éventuellement la partager avec d'autres utilisateurs. Le prototype demande après à l'utilisateur de choisir la type de sa requête : soit presque identique si l'utilisateur est sûr de ses informations (avoir dessiné tous les composants) soit similaire. La figure IV. 6 montre le message affiché à l'utilisateur pour sélectionner le type d'interrogation.

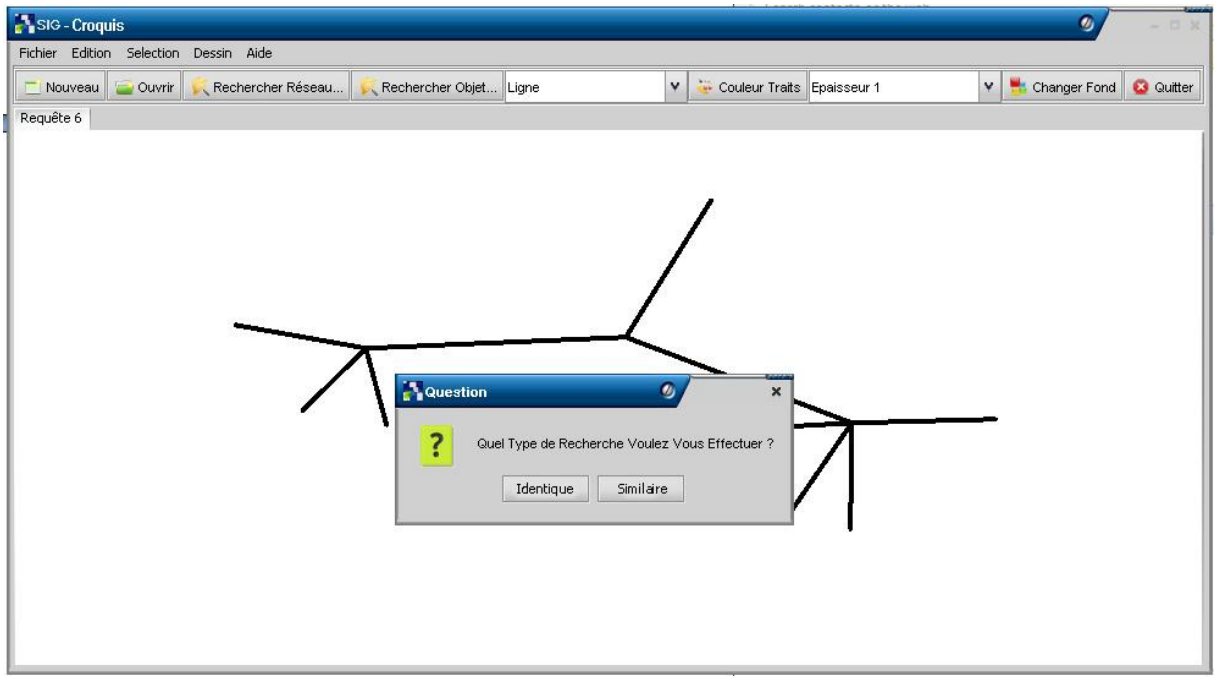


Figure IV. 6. Message pour sélectionner le type d'interrogation

Selon le type choisi, une recherche est effectuée dans la base pour trouver les configurations vérifiant les critères exigés par l'utilisateur. Les configurations retrouvées sont triées selon l'ordre décroissant de leur similarité avant d'être affiché à l'utilisateur. La figure IV. 7 illustre notre manière de montrer les résultats à l'utilisateur. Le degré de similarité est indiqué dans l'entête de chaque configuration.

Figure IV. 7. Résultat répondant à la requête présentée dans la figure IV. 6

- **<u>Exemple 2 (échelle particulière)</u>**

L'utilisateur, dans ce cas, formule sa requête en utilisant les objets de type cercle, rectangle ou polygone. Nous supposons que l'utilisateur dessine une configuration à travers un ensemble d'objets qui ont presque la même taille. La figure IV. 8 présente un exemple de ce type de requête.

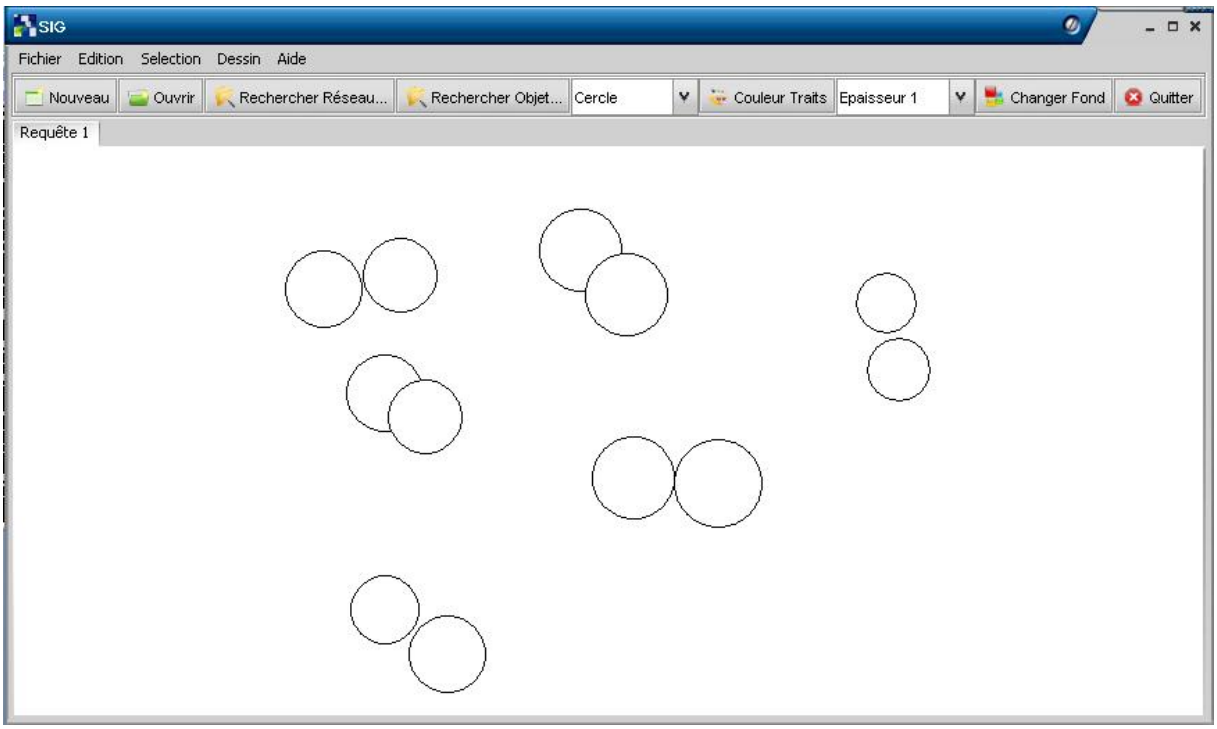


Figure IV. 8. Exemple de requête à une échelle particulière

Comme les objets ont presque la même taille, le prototype considère que l'utilisateur s'intéresse à une échelle particulière. La première étape dans le processus de recherche est la construction de graphe de voisinage spatial pour la requête dessinée. Le prototype affiche le résultat de cette étape en permettant de modifier le croquis pour en changer l'interprétation (Figure IV. 9).

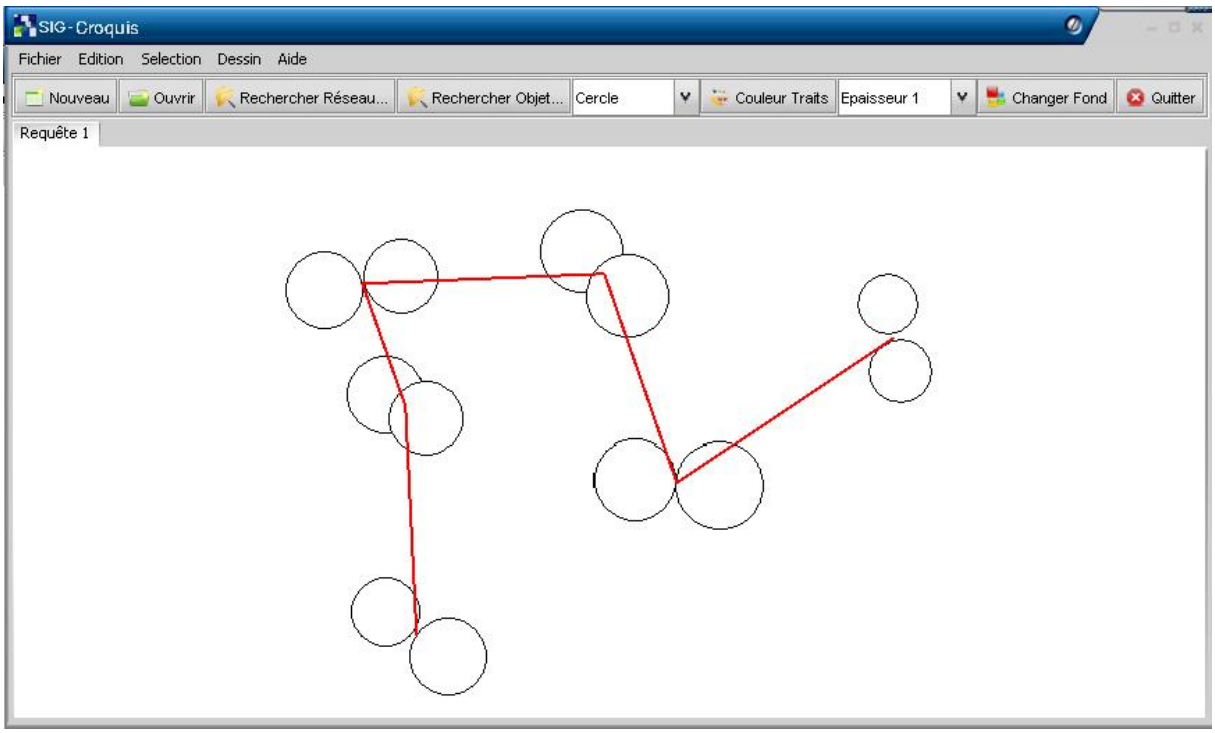


Figure IV. 9. Construction du graphe de voisinage spatial pour la requête présentée dans la figure IV. 8

Quand l'utilisateur est satisfait, il confirme l'interprétation. Le prototype lance alors la recherche et en lui demandant s'il veut enregistrer la configuration pour l'utiliser ultérieurement comme requête prédéfinie.

L'étape suivante consiste à afficher les résultats qui sont toujours triés par ordre décroissant de leur similarité. Le résultat est semblable à ce qui était présenté dans la figure IV. 7.

- **Exemple 3 (multi-couches)**

L'utilisateur dessine sa requête en combinant plusieurs types d'objets. Pour dessiner la requête présentée dans cet exemple (figure IV. 10), l'utilisateur a mixé plusieurs objets de types et de tailles différents.

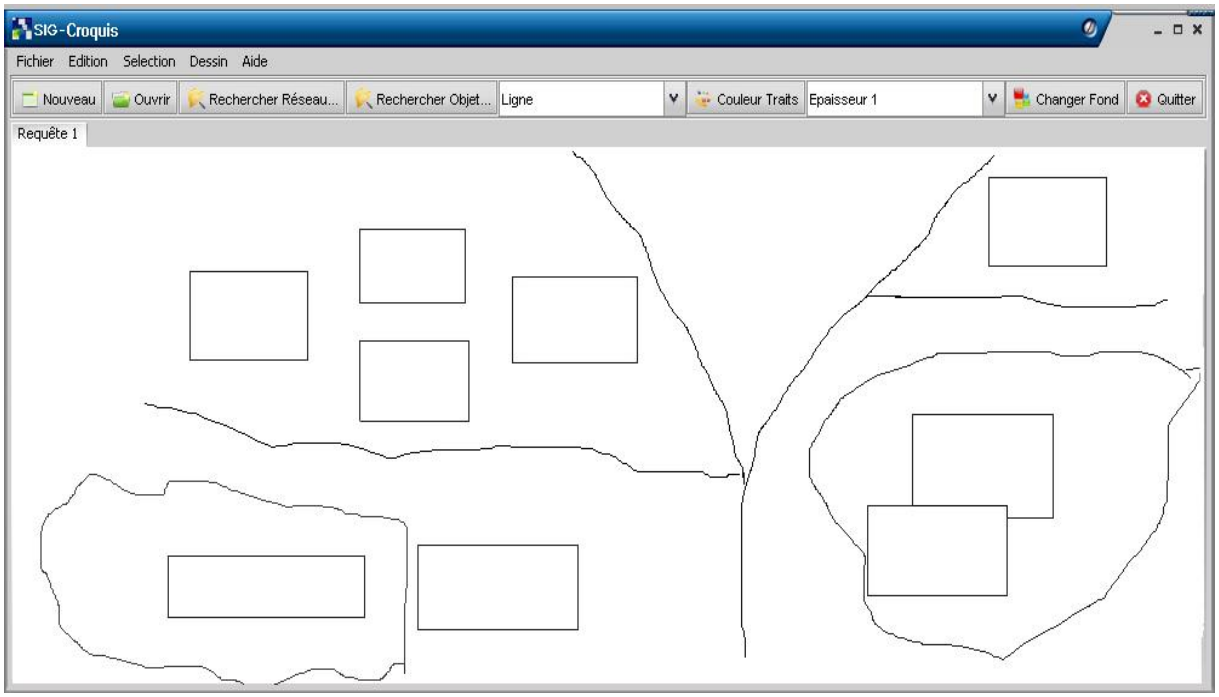


Figure IV. 10. Exemple d'une requête multi-couches

La première étape dans le processus de traitement de cette requête est la détection des différentes couches existantes dans la requête. Le prototype analyse les composants dessinés et crée une série de couches en fonction de la taille et du type de ces composants. Il représente chaque couche (dans un onglet) comme une requête séparée ce qui permet à l'utilisateur de visualiser les résultats de cette étape et de revenir à la requête initiale pour modifier son croquis s'il n'est pas satisfait de l'interprétation. Il donne également à l'utilisateur la possibilité de comparer les résultats obtenus en utilisant une seule couche avec ceux retournés pour répondre à la requête initiale (combinant plusieurs couches) (cf. III. 4. 3). La figure IV. 11 montre les différentes couches de la requête présentée dans la figure IV. 10. Les résultats sont également présentés de la même manière de la figure IV. 7.

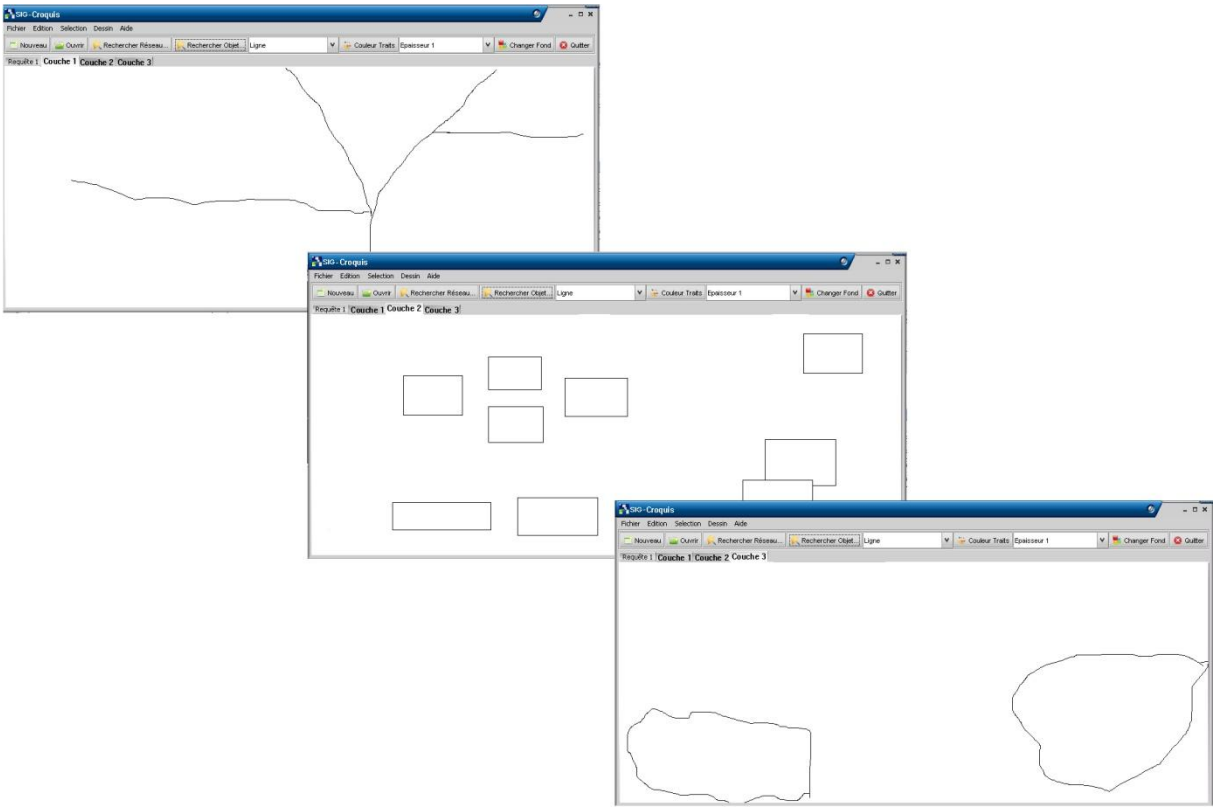


Figure IV. 11. Trois couches obtenues à partir de la requête présentée dans la figure IV. 10

Après avoir détaillé l'architecture générale du prototype et illustré son utilisation à travers ces trois exemples, nous présentons dans la section suivante l'évaluation de ses performances et les validations des hypothèses mentionnées au début de ce chapitre.

IV. 4. Évaluation

Le résultat de la comparaison d'un croquis avec un ensemble de configurations spatiales est un ensemble de valeurs qui peut être utilisé pour ordonner ces configurations en fonction de leur similarité avec cette requête. Par conséquent, la liste obtenue peut être considérée comme une expression montrant l'efficacité d'un système à trouver des configurations similaires.

Le changement du modèle (la manière de représenter les données) et les mesures de similarité ont un impact sur les valeurs de similarité et sur l'ordre des éléments de la liste obtenue. Ainsi, une méthode qui compare ces deux paramètres ou un parmi eux peut être employée pour évaluer différentes approches permettant la recherche des configurations spatiales.

Dans les deux sous-sections suivantes, nous cherchons à prouver les deux hypothèses mentionnées au début de ce chapitre, en comparant les performances de notre approche avec celles d'une approche classique basée sur l'appariement des graphes complets.

IV. 4. 1. Capacité à trouver les résultats retournés par l'approche classique

Nous avons suggéré de comparer les résultats obtenus par notre approche (graphe de voisinage spatial) avec ceux obtenus par l'approche classique puisque le graphe complet :

- contient toutes les informations existantes dans une configuration ;
- offre les meilleurs résultats dans l'appariement exact (sans prendre en compte le temps d'exécution).

Nous avons montré que l'appariement par graphe complet n'arrive pas à obtenir de résultats pertinents si la représentation de la requête est assez altérée par rapport aux besoins réels de l'utilisateur. Ainsi pour maximiser les performances des résultats obtenus par une approche basée sur l'utilisation d'appariement entre graphes complets, nous avons opté de se référer à un ensemble de requêtes extraites de la base de données au lieu de se baser sur d'autres issues des dessins fournis pas un utilisateur (qui risquent d'être mal construits).

Pour comparer deux listes ordonnées (obtenues par deux méthodes de recherche différentes), nous pouvons évaluer deux paramètres :

- les degrés de pertinence des éléments partagés par les deux listes ;
- l'ordre de ces éléments.

Les utilisateurs des systèmes de RI s'intéressent généralement à vérifier le deuxième paramètre. Par conséquent, il est le plus adéquat pour évaluer les modèles et les méthodes utilisés.

Plusieurs méthodes ont été élaborées pour évaluer ce paramètre. Parmi les plus utilisés, nous employons la méthode de Spearman [Tate et al. 1957] et celle de Wilcoxon [Daniel 1978].

- **Corrélation de Spearman**

Ce test consiste à trouver un coefficient de corrélation, non pas entre les valeurs prises par les deux listes mais entre les rangs de ces valeurs. Cette corrélation est utilisée lorsque les distributions des variables sont asymétriques. Ce coefficient est présenté par l'équation [1] et il prend une valeur comprise entre -1 et +1, où +1 signifie une concordance parfaite, tandis que -1 signale le désaccord complet (les deux listes sont inversement ordonnées). Une valeur de 0 signifie qu'il n'y a pas de relations entre les deux listes.

$$R = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(U_i - V_i)^2}{n*(n^2-1)} \qquad [1]$$

avec n le nombre d'éléments dans la liste, $\{U_i, V_i\}$ le rang de l'élément i respectivement dans les listes U et V.

- **Test de rang de Wilcoxon**

Le test de Wilcoxon est plus précis que celui de Spearman, mais il est aussi plus complexe à calculer. La première étape de ce test consiste à calculer pour chaque élément partagé i la différence de ses degrés de similarité d_i, puis à ranger tous les d_l sans tenir compte de leur signe. Il est possible qu'un élément ait le même degré de similarité dans les deux listes (d_k = 0). De telles paires sont abandonnées. En outre, si deux ou plus des différences entre paire sont égales, elles partageront le même rang. Ce nouveau rang est obtenu en calculant la moyenne des rangs de ces paires. Par exemple, si les premières différences sont -1, -1 et +1, chaque paire aura le rang 2, car (1 + 2 + 3) / 3 = 2. La différence suivante aura alors le rang 4, puisque les rangs 1, 2, et 3 ont déjà été utilisés. Nous affectons par la suite à chaque rang le signe de la différence.

Nous calculons la somme de tous les rangs positifs (W_+) et la somme de tous les ranges négatifs (W_-). Nous déterminons une constante T qui correspond à la plus grande valeur absolue de ces deux sommes.

Selon le nombre l de paires dont la différence n'est pas nulle, deux cas peuvent se présenter :

- l ≤30, T est comparé à l'élément d'indice l d'une table de référence prédéfinie. Si T est supérieur à cette valeur, alors nous pouvons déduire que les deux listes sont corrélées ;
- l > 30 nous calculons une valeur z donnée par l'équation [2] qui est une variable normale standardisée. Nous la comparons avec la table de loi normale. Une valeur élevée de z indique que les deux listes sont corrélées.

$$z = \frac{T - l * (l+1)/4}{\sqrt{l*(l+1)*(2*l+1)/24}} \qquad [2]$$

- **Résultat**

Comme nous l'avons mentionné ci-dessus, nous avons choisi des images de la base pour être utilisées comme requêtes. En effet, l'utilisation d'une part des images pour l'interrogation et d'autre part du graphe complet pour l'appariement limitent le nombre d'images similaires. Le nombre maximum d'images retournées dans ce cas ne dépasse pas six (ce nombre est maximum si le changement d'échelles n'implique pas la suppression des objets). En revanche, si nous utilisons notre approche pour faire l'interrogation, nous obtenons au moins 6 résultats par requêtes.

Comme nous avons mentionné dans le début de ce chapitre (cf. IV.2), notre corpus de test contient des images couvrant 38 zones différentes. Chaque zone nous permet de peupler notre base par 150 configurations supplémentaires (les images correspondantes à chacune des deux résolutions disponibles seront fragmentées en 25 portions et elles subiront deux opérations de modification).

Pour évaluer d'une manière exhaustive la capacité de notre approche à retrouver les mêmes résultats que ceux remontés par le système classique, nous avons pris au hasard une configuration pour chacune de ces 38 zones. En utilisant cette collection de test, deux séries d'interrogation ont été appliquées sur notre base (appariement par graphe complet et par graphe de voisinage spatial).

Requête	Spearman	Wilcoxon
1	1	0
2	-0,5	3
3	0,74	7,5
4	0,57	3
5	0,85	5
6	1	0
7	-1	-1,5
8	0,68	5
9	0,5	1,5
10	0,62	10,5
11	0,51	8
12	0,74	7,5
13	0,5	1,5
14	1	0
15	0,85	5
16	0,74	7,5
17	-0,5	3
18	0,62	10
19	-1	-1,5
20	0,5	1,5
21	0,57	8
22	0,74	1,5
23	0,5	1,5
24	0,57	3
25	1	0
26	1	0
27	-1	-1,5
28	0,51	8
29	0,45	5
30	0,28	7,5
31	-0,5	3
32	0,45	5
33	0,5	1,5
34	0,28	7,5

35	0,4	10,5
36	-0,5	3
37	0,34	6
38	0,62	6
Moyenne	0,384	4

Tableau IV. 1. Comparaison de deux approches en utilisant les mesures de Spearman et Wilcoxon

En utilisant le graphe complet, nous avons obtenu 6 résultats pour 23 images parmi les 38 candidates et 3 résultats pour les 15 autres.

Nous avons comparé les deux listes obtenues par les deux approches pour chaque image en utilisant les deux méthodes mentionnées ci-dessus (ces méthodes ne comparent que les éléments en commun dans les deux listes d'images retournées). Les résultats de cette comparaison sont présentés dans le tableau IV. 1.

Ce tableau montre une corrélation significative entre les deux listes selon les deux mesures, surtout pour les requêtes qui correspondent à celles ayant 6 images comme résultats. Les moyennes pour ces 23 requêtes sont 0,613 (selon la méthode de Spearman) et 5,95 (selon la méthode de Wilcoxon).

Les quelques signes négatifs qui apparaissent dans la colonne de la première méthode viennent du fait que le système basé sur le graphe complet rend un nombre réduit de résultats (3 images), alors que cette méthode est souvent appliquée à des listes de résultat contenant des dizaines d'éléments.

Les résultats obtenus par notre approche sont prometteurs pour ce type de requête (image extraite de la base). Le prototype a réussi à trouver les configurations similaires pour chaque image utilisée. De plus, nous avons constaté qu'il est capable de tolérer les petites différences (dues aux changements de résolutions).

IV. 4. 2. Capacité à répondre aux requête à base de croquis

Nous voulons, dans cette partie, confirmer l'amélioration des résultats prouvée dans la section précédente. En effet, nous cherchons à prouver que notre système permet un certain degré de tolérance pour absorber le manque de précision et l'approximation de l'information dans la description fournie par le croquis de l'utilisateur.

Pour cela nous avons demandé à 9 utilisateurs de dessiner 10 configurations spatiales particulières. Faute des règles prédéfinies pour juger la similarité entre l'image et le croquis de l'utilisateur (plusieurs paramètres doivent être évalués et le jugement est plutôt subjectif), nous demandons à chaque utilisateur de juger les dessins des autres.

D'une manière détaillée, notre protocole de test se déroule de la manière suivante :

- nous montrons à chacun des utilisateurs une image de la base pendant 30 secondes ;
- nous cachons l'image et nous demandons à l'utilisateur d'essayer de griffonner un croquis qui représente l'image qu'il vient de visionner ;
- quand l'utilisateur a fini son dessin, nous présentons d'une manière simultanée son croquis ainsi que l'image initiale aux autres utilisateurs en leur demandant de donner une note de 1 à 4 (médiocre, faible, bien, parfait) qui caractérise la représentativité du croquis ;
- ce processus est répété pour les 9 utilisateurs, en utilisant les 10 configurations.

Nous calculons la moyenne de jugement pour chaque utilisateur et nous obtenons le tableau IV. 2 :

Utilisateur	im1	im2	im3	im4	im5	im6	im7	im8	im9	im10
1	3	3,25	2,5	3,37	3,12	3,25	2,87	3,37	3	3,5
2	2,12	2,62	1,5	3,25	2,37	1,37	3,25	3	2,75	3,25
3	1,5	2,25	1,25	2,37	1,87	1,37	1,12	1,5	2,25	2
4	2,25	2,37	2,75	2,37	1,5	2,12	2,75	1,62	2,5	2,12
5	3,37	2,75	3,37	3,12	2,37	3	3,37	3,25	2,62	3,75
6	2,37	2,5	2,62	3,25	2,25	2,37	2,12	2,37	2,37	3,5
7	2,12	2,25	2,75	2,87	3	2,62	1,62	2,25	3,12	2,5
8	1,62	1,5	1,37	1,37	1,5	1,62	1,37	2,5	2,75	1,62
9	3,37	3,25	3,25	3,5	3,37	2,37	3	3,12	3,62	3,75

Tableau IV. 2. Jugement moyen de chaque croquis fait par les différents utilisateurs

Nous avons remarqué que notre prototype est capable de trouver les bons résultats pour toutes les requêtes jugées similaires à la configuration (ayant une moyenne d'évaluation supérieure à 2,8). En effet, il remonte pour chaque requête l'ensemble de 6 images similaires plus un ensemble d'autres images qui augmente avec la diminution du degré de similarité.

Nous avons également constaté que :

- les requêtes ayant une moyenne d'évaluation comprise entre 1,9 et 2,8 remontent certains éléments pertinents mais avec beaucoup de bruit (des images non pertinentes) ;
- les requêtes ayant une moyenne d'évaluation inférieure à 1,9 ne remontent pas d'images pertinentes et dans certain cas, ne remontent aucun résultat.

IV. 5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'architecture générale de notre prototype (SIG-Croquis) qui permet à l'utilisateur de formuler ses requêtes de manière graphique. Nous avons illustré son utilisation à travers trois exemples représentant respectivement un réseau géographique, des régions à une échelle particulière et une configuration multi-couches.

Ce cadre applicatif nous a permis d'évaluer nos propositions présentées dans le chapitre précédent. Notre validation a été menée sur un corpus de test composé d'un ensemble d'images aériennes. Les résultats obtenus confirment notre approche.

L'originalité des travaux que nous avons réussi à prouver dans ce chapitre concerne les deux points suivants :

- la capacité de notre approche à trouver les résultats retournés par l'approche classique ;
- la capacité à absorber l'approximation de l'information fournie par l'utilisateur et le manque de précision dans sa description.

Conclusion générale

Conclusion générale 111

1. Bilan 115
2. Intérêt et originalité de notre approche 115
3. Limites et perspectives à nos travaux 117

1. Bilan

Nous avons présenté dans ce mémoire notre approche en matière de gestion de base de données géographiques. Cette approche est basée sur deux axes : la modélisation et l'interrogation des configurations spatiales. La combinaison de ces axes permet de faciliter l'accès aux données géographiques à tout type d'utilisateurs (quelque soit son niveau d'expertise).

En premier lieu, nous avons porté notre attention sur la représentation de ce type de données. Notre approche de modélisation s'appuie essentiellement sur le regroupement des objets en fonction de leur type et leur taille. Ce regroupement permet de fragmenter une configuration spatiale en plusieurs couches. Ainsi, nous serons capables de présenter séparément les différentes couches qui composent une configuration et les relations qui les relient. Une telle décomposition facilite la gestion des contenus complexes des données géographiques sans perdre la vision globale de ces données.

En deuxième lieu, nous avons mis en place une démarche d'interrogation flexible. Cette démarche permet d'effectuer des interrogations mono et multi couches. Ceci en offrant à l'utilisateur la possibilité de dessiner un croquis pour décrire ses besoins. Elle permet par la suite de transformer ce croquis sous forme de graphe. Une opération de simplification sera effectuée avant d'instancier notre modèle. Enfin, notre démarche assure l'appariement de ce graphe avec ceux représentant d'autres configurations déjà enregistrées dans une base de données géographiques.

Afin de valider nos propositions, nous avons développé, dans la dernière partie de cette thèse, un outil d'intégration par croquis. Cet outil, appelé SIG-Croquis, implémente les modèles proposés. Il permet ainsi de fragmenter et de stocker les configurations spatiales de façon flexible de manière à faciliter leur gestion et leur exploitation.

2. Intérêt et originalité de notre approche

L'ensemble des travaux présentés dans le premier chapitre (cf. I. 4) permettent d'interroger des bases d'image en utilisant le croquis. Par contre, nous avons constaté l'absence de la prise en compte du manque de précisons et l'approximation des informations dans la description de l'utilisateur. Ces approches se basent également sur des algorithmes qui nécessitent un temps de calcul important. Afin de résoudre ces insuffisances, nous nous sommes basés, en premier lieu, sur une étude sur le comportement des utilisateurs quand ils dessinent leurs croquis.

Les étapes précédentes nous permettent de bien positionner notre approche par rapport aux autres travaux qui ont abordé ce type de problème dans d'autres domaines (dessins animés, ingénierie des pièces mécaniques, etc.). Avant de pouvoir utiliser le

croquis dans un système d'interrogation, une étape de transformation est indispensable. Cette étape permettra d'extraire les objets qui composent ce croquis ainsi que les relations qui les relient. Nous avons montré que le graphe présente une forme fiable pour assurer cette transformation.

Ainsi la comparaison de la configuration d'un croquis avec celle d'un document de la base revient à comparer leurs graphes respectifs. C'est dans ce cadre que nous avons dressé un état de l'art sur les méthodes d'appariement de graphes. Cet état de l'art, nous a permis de découvrir plusieurs lacunes et plusieurs pistes d'amélioration possibles. Parmi ces piste, nous nous sommes concentrés sur la simplification des graphes (sans perte de sémantique) afin de réduire le temps de traitement et pour être plus tolèrants dans le processus d'appariement.

Nous avons proposé en premier lieu de fragmenter les configurations à traiter en plusieurs couches. Ces couches peuvent être de type réseau géographique ou groupe de régions. Selon ces deux types, nous avons proposé deux méthodes de simplification de graphe.

Pour le premier type, nous filtrons les relations en gardant uniquement celles qui relient les objets adjacents (les voisins directs).

Pour le deuxième type, nous n'avons pas de relations adjacentes entre les objets. Nous étions donc amenés à proposer une méthode de simplification basée sur la création des groupes d'objets et la définition des relations inter et intra-groupes. La définition de ces relations s'effectue en donnant un poids plus important à ce deuxième type de relation.

Cette dichotomie dans le processus de simplification a engendré la proposition de deux mesures de similarité selon le type de couche.

La fragmentation des configurations, nous a également permis de proposer deux types d'interrogation :

- une interrogation mono couche basée sur l'appariement de deux graphes ;
- une interrogation multi-couche basée sur une méthode combinant l'appariement des différentes couches. Cette méthode permet, en premier lieu, d'évaluer séparément la similarité entre les couches analogues. Elle mesure ensuite la cohérence entre ces différentes couches.

L'outil développé, nous a permis de valider la faisabilité et la fiabilité de nos approches de modélisation, de simplifications de graphes et d'interrogation des bases de données géographiques. L'expérimentation basée sur l'utilisation de ce prototype a porté des preuves affirmant que nos approches sont capable de répondre aux besoins émergeants en matière de gestion des bases de données géographiques.

3. Limites et perspectives à nos travaux

Les résultats obtenus dans le cadre de la gestion de données géographiques sont très encourageants et nous permettent d'envisager un approfondissement des approches proposées. En particulier, les développements, les difficultés rencontrées et les résultats obtenus ont mis en évidence un certain nombre de perspectives à nos travaux.

A court terme, ces perspectives portent principalement sur :

- la gestion du passage à l'échelle de notre application. En effet, l'interrogation d'une base d'images avec la mise en œuvre actuelle implique une recherche linéaire qui compare le croquis avec tous les éléments de la base. Cette approche fonctionne bien pour un prototype, mais il semble difficile d'appliquer son fonctionnement pour une grande base du monde réel. À notre sens, deux possibilités sont envisageables pour assurer le bon déroulement de ce passage : (1) la classification des configurations de la base ; (2) la création d'un ficher index adapté à notre base (ce fichier contient des graphes élémentaires. Un graphe élémentaire est une petite configuration composée d'un objet central avec l'ensemble de ses voisins).
- l'élargissement de la liste des paramètres à prendre en compte dans le processus d'interrogation. L'évaluation présentée dans la chapitre IV montre que l'information composant le graphe de voisinage spatial est largement suffisante pour interroger une base des configurations spatiales. Cependant, il faut étudier l'intérêt d'utiliser les relations temporelles entre les composants pour comparer des graphes de voisinage spatial. Nous traitons actuellement le résultat final de la construction de croquis. Or ce dernier résulte de l'enchainement temporel de construction de plusieurs objets. La prise en compte de l'ordre dans lequel chaque objet a été dessiné peut apporter des informations supplémentaires permettant de renforcer les relations entre les objets dessinés d'une manière consécutive. Il faut étudier également l'impact d'utiliser la sémantique des objets dans la construction du graphe de voisinage si ce type d'information existe.

A moyen terme, les perspectives envisagées couvrent les aspects suivants :

- l'enrichissement des possibilités d'interaction avec notre prototype. SIG-Croquis est uniquement basé sur l'utilisation des dessins afin de décrire des configurations spatiales. Offrir à l'utilisateur la possibilité de combiner plusieurs modalités d'interaction (dessin, parole, texte, etc.) semble être une piste de recherche très prometteuse. Cependant, il est important de bien gérer l'interprétation et la synchronisation entre ces différentes modalités d'interaction (par exemple, mettre en place une stratégie pour résoudre les conflits si les canaux d'entrée se contredisent).

- l'utilisation de notre approche pour gérer la gestion de l'évolution des configurations spatiales au fil du temps. Une configuration spatiale peut subir des modifications entre deux dates. Elle sera donc représentée par deux graphes différents. La mesure de similarité entre ces deux graphes nous permet de découvrir l'importance de l'impact de ces modifications (nombre d'objets et/ou de relations mises à jour). Dans le cas où cet impact est assez important, une mise à jour de la base est obligatoire pour assurer la représentativité de monde réel. Le fait de savoir exactement quelle sont les parties concernées par ces changements, nous permet de modifier partiellement la représentation de la première image (déjà stockée dans notre base) au lieu de relancer un processus de traitement (qui peut être assez lourd) pour représenter la totalité de contenu de la nouvelle image.

Bibliographie

[*A*]

[Allen et al. 1997] R. Allen, L. Cinque, S. Tanimoto, L. Shapiro and D. Yasuda, "A parallel algorithm for graph matching and its MasPar implementation", Journal of IEEE parallel and distributed systems, Vol. 8, No. 5, PP. 490-501, 1997.

[Allen 1994] J. Allen, "Natural language understanding", Benjamin Cummings, 2ème Edition, 1994.

[Almohamad et al. 1993] H. Almohamad and S. Duffuaa, "A linear programming approach for the weighted graph matching problem", Journal of IEEE pattern analysis and machine intelligence, Vol. 15, No. 5, PP. 522-525, 1993.

[*B*]

[Balas et al. 1986] E. Balas and C. S. Yu, "Finding a maximum clique in an arbitrary graph", Journal of SIAM on computing, Vol. 15, No. 4, PP. 1054-1068, 1986.

[Berchtold et al. 1997] S. Berchtold and H. Kriegel, "S3: Similarity in CAD database systems", Conference of ACM management of data (SIGMOD), PP. 564-567, Tucson, USA, 1997.

[Berretti et al. 2001] S. Berretti, A. Del Bimbo and E. Vicario, "Efficient matching and indexing of graph models in content-based retrieval", Journal of IEEE pattern analysis and machine intelligence, Vol. 23, No. 10, PP. 1089-1105, 2001.

[Blaser 2000] A. Blaser, "A study of people's sketching habits in GIS", Journal of spatial cognition and computation, Vol. 2, No. 4, PP. 393-419, 2000.

[Blaser et al. 2000] D. Blaser, M. Sester and M. Egenhofer, "Visualization in an early stage of the problem-solving process in GIS", Journal of computers and geosciences, Vol. 26, No. 1, PP. 57-66, 2000.

[Bron et al. 1973] C. Bron and J. Kerbosch, "Finding all cliques of an undirected graph", Journal of ACM communication, Vol. 16, No. 9, PP. 575-577, 1973.

[Buxton 1986] W. Buxton, "There's more to interaction than meets the eye: some issues in manual input", In D. Norman, and S. Draper, "User centered system design: new perspectives on human-computer interaction", Lawrence Erlbaum, PP. 319-337, 1986.

[*C*]

[Christmas et al. 1995] W. Christmas, J. Kittler and M. Petrou, "Structural matching in computer vision using probabilistic relaxation", Journal of IEEE pattern analysis and machine intelligence, Vol. 17, No. 8, PP. 749-764, 1995.

[Collins 1979] A. Collins, "Children's Language and Communication", Lawrence Erlbaum Associates, 1979.

[Coppock et al. 1991] J. Coppock and D. Rhind, "The history of GIS", In D. Maguire, M. Goodchild, and D. Rhind, "Geographical information systems: principles and applications", Longman scientific and technical, Vol. 1, PP. 21-43, 1991.

[Cordella et al. 2001] L. Cordella, P. Foggia, C. Sansone and M. Vento, "An improved algorithm for matching large graphs", Workshop on graph-based representations in pattern recognition, PP. 149-159, Ischia, Italy, 2001.

[Cordella et al. 2000] L. Cordella, P. Foggia, C. Sansone and M. Vento, "Fast graph matching for detecting CAD image components", Conference of pattern recognition, PP. 1034-1037, Barcelona, Spain, 2000.

[*D*]

[Daniel 1978] W. Daniel, "Applied nonparametric statistics", Houghton Mifflin Company, 1978.

[De Santo et al. 2003] M. De Santo, P. Foggia, C. Sansone and M. Vento, "A large database of graphs and its use for benchmarking graph isomorphism algorithms", Journal of pattern recognition letters, Vol. 24, No. 8, PP. 1067-1079, 2003.

[Demers 1997] M. Demers, "Fundamentals of geographic information systems", John Wiley and Sons, 1997.

[Dumay et al. 1992] A. Dumay, R. Geest, J. Gerbrands, E. Jansen and J. Reiber, "Consistent inexact graph matching applied to labelling coronary segments in arteriograms", Conference of pattern recognition, Vol. 3, PP. 439-442, Hague, Netherlands, 1992.

[*E*]

[Egenhofer et al. 1993] M. Egenhofer and J. Herring, "Querying a geographical information systems", In D. Medyckyj-scott and H. Hearnshaw, "Human factors in geographical information systems", Bellhaven press, PP. 124-136, 1993.

[Egenhofer 1992] M. Egenhofer, "Why not SQL!", Journal of geographical information systems, Vol. 6, No. 2, PP. 71-85, 1992.

[Egenhofer et al. 1991] M. Egenhofer and J. Herring, "Categorizing binary topological relations between regions, lines and points in geographic databases", Technical Report, Department of Surveying Engineering, University of Maine, 1991.

[Egenhofer 1990] M. Egenhofer, "Interaction with geographical information systems via spatial queries", Journal of visual languages and computing, Vol. 1, No. 4, PP. 389-413, 1990.

[Eshera et al. 1984] M. Eshera and K. Fu, "A graph distance measure for image analysis", Journal of IEEE transaction on system, man and cybernetics, Vol. 14, No. 3, PP. 398-408, 1984.

[*F*]

[Ferri et al. 2005] F. Ferri and M. Rafanelli, "GeoPQL: a geographical pictorial query language that resolves ambiguities in query interpretation", Journal on data semantics III, LNCS 3534, PP. 50-80, 2005.

[Fischler et al. 1973] M. Fischler and R. Elschlager, "The representation and matching of pictorial structures", Journal of IEEE computers, Vol. 22, No. 1, PP. 67-92, 1973.

[Foggia et al. 2001] P. Foggia, C. Sansone and M. Vento, "A performance comparison of five algorithms for graph isomorphism", Workshop of graph-based representations in pattern recognition, PP. 188-199, Ischia, Italy, 2001.

[Fuchs et al. 2000] F. Fuchs and H. Lemen, "Efficient subgraph isomorphism with a priori knowledge", Workshop on syntactic and structural pattern recognition, PP. 427-436, Alicante, Spain, 2000.

[Fuchs et al. 1999] F. Fuchs and H. Lemen, "Building reconstruction on aerial images through multi-primitive graph matching", Workshop on graph-based representations in pattern recognition, PP. 21-30, Haindorf, Austria, 1999.

[*G*]

[Ghahraman et al. 1980] D. Ghahraman, A. Wong and T. Au, "Graph monomorphism algorithms", Journal of IEEE systems, man and cybernetics, Vol. 10, No. 4, PP. 189-197, 1980.

[Ghazal et al. 2008] M. Ghazal and F. Sèdes, "Similarity among geographic networks", Conference IEEE on information and communication technologies: from theory to applications (ICTTA), PP. 1-6, Damascus, Syrie, 2008.

[Ghazal et al. 2009] M. Ghazal and F. Sèdes, "Remodelling geographic data to facilitate the interrogation by sketch", Conference IEEE on signal-image technology and internet based systems (SITIS), Marrakesh, Morocco, 2009. (In press)

[Ghazal et al. 2010] M. Ghazal and F. Sèdes, "Système de recherche d'informations spatiales basé sur le croquis à main levée", Conférence en recherche d'information et applications (CORIA), PP. 337-348, Sousse, Tunisie, 2010.

[Goldschmidt 1991] G. Goldschmidt, "The dialectics of sketching", Journal of creativity research, Vol. 4, No. 2, PP. 123-143, 1991.

[Goodchild et al. 1990] M. Goodchild and K. Kemp, "NCGIA Core Curriculum in GIS", National center for geographic information and analysis, University of California, Santa

Barbara, http://www.geog.ubc.ca/courses/klink/gis.notes/ncgia/toc.html, Accédé en 01/03/2007.

[Goodchild et al. 1987] M. Goodchild and F. Michael, "A spatial analytical perspective on geographical information systems", Journal of geographical information science, Vol. 1, No. 4, PP. 327-334, 1987.

[Gross 1996] M. Gross, "The electronic cocktail napkin : a computational environment for working with design diagrams", Journal of design studies, Vol. 17, No. 1, PP. 53-69, 1996.

[Gregory et al. 2002] L. Gregory and J. Kittler, "Using graph search techniques for contextual colour retrieval", Workshop on structural, syntactic, and statistical pattern recognition (SSPR), PP. 186-194, Ontario, Canada, 2002.

[Guignard et al. 1987] M. Guignard and S. Kim, "Lagrangean decomposition: A model yielding stronger Lagrangean bounds", Journal of mathematical programming, Vol. 39, No. 2, PP. 215–228, 1987.

[*H*]

[Hopfield et al. 1987] J. Hopfield and D. Tank, "Collective computation in neuronlike circuits", Journal of scientific american, Vol. 257, No. 6, PP. 104-114, 1987.

[Hou et al. 2008] S. Hou and K. Ramani, "Structure-oriented contour representation and matching for engineering shapes", Journal of computer aided design, Vol. 40, No. 1, PP. 94-108, 2008.

[Hou et al. 2007] S. Hou and K. Ramani, "Classifier combination for sketch-based 3D part retrieval", Journal of computers & graphics, Vol. 31, No. 4, PP. 598-609, 2007.

[*I*]

[Irniger et al. 2001] C. Irniger and H. Bunke, "Graph matching: filtering large databases of graphs using decision trees", Workshop on graph-based representations in pattern recognition, PP. 239-249, Ischia, Italy, 2001.

[*J*]

[Jolion 2001] J. Jolion, "Graph matching: what are we talking about?", Workshop on graph-based representations in pattern recognition (GBR), PP. 170-175, Breschia, Italie, 2001.

[*K*]

[Knob 2005] A. Knob, "L'interface utilisateur graphique, l'indispensable changement du paradigme", Journal of flash informatique, No. 7, PP. 17-20, 2005.

[Khoo et al. 2001] K. Khoo and P. Suganthan, "Multiple relational graphs mapping using genetic algorithms", Conference of evolutionary computation, PP. 727-733, Seoul, South Korea, 2001.

[Kittler et al. 1989] J. Kittler and E. Hancock, "Combining evidence in probabilistic relaxation", Journal of pattern recognition and artificial intelligence, Vol. 3, No. 1, PP. 29-51, 1989.

[Kosinov et al. 2002] S. Kosinov and T. Caelli,"Inexact multisubgraph matching using graph eigenspace and clustering models", Workshops on syntactical and structural pattern recognition and statistical pattern recognition, PP. 133-142, Windsor, Canada , 2002.

[*L*]

[Landay et al. 2001] J. Landay and B. Myers, "Sketching interfaces: toward more human interface design", Journal of computer, Vol. 34, No. 3, PP. 56-64, 2001.

[Laurini et al. 1992] R. Laurini and D. Thompson, "Fundamentals of spatial information systems", Academic Press, 1992.

[Lawler 1976] E. S. Lawler, "Combinatorial optimization: networks and matroids", Holt, Rinehart and Winston, 1976.

[Leung et al. 2003] W. Leung and T. Chen, "Hierarchical matching for retrieval of hand-drawn sketches", Conference IEEE on multimedia and exposition (ICME), Vol. 2, PP. 29-32, Baltimore, USA, 2003.

[Leung et al. 2002] W. Leung and T. Chen, "User-independent retrieval of free-form hand-drawn sketches", Conference of IEEE acoustics, speech and signal processing (ICASSP), Vol. 2, PP. 2029-2032, Orlando, USA, 2002.

[Levick 1998] M. Levick "See what I'm saying: what children tell us through their art", Islewest Publishing, 1998.

[Lewis 1995] T. Lewis, "Living in real time, side A", Journal of IEEE computer, Vol. 28, No. 9, PP. 8-10, 1995.

[Liu et al. 1995] C. Liu, K. Fan, J. Horng and Y. Wang, "Solving weighted graph matching problem by modified microgenetic algorithm", Conference of IEEE system, .man and cybernetics, PP. 638-643, Vancouver, Canada, 1995.

[Lopez-Ornelas et al. 2008] E. Lopez-Ornelas and F. Sèdes, "Cartographic Elements Extraction using High Resolution Remote Sensing Imagery and XML Modeling", conference IEEE on geoscience and remote sensing, PP. 125-136, Boston, USA, 2008.

[López-Ornelas 2005] E. López-Ornelas, « Segmentation d'images satellitaires à haute résolution et interaction avec l'information géographique : application à l'extraction de connaissances », thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, 2005.

[*M*]

[Mascio et al. 2004] T. Mascio, M. Francesconi, D. Frigioni and L. Tarantino, "Tuning a CBIR system for vector images: the interface support", Conference of advanced visual interfaces (AVI), PP. 425-428, Gallipoli, Italy, 2004.

[Mauro et al. 2001] C. Mauro, M. Diligenti, M. Gori and M. Maggini, "Similarity learning for graph-based image representations", Workshop on graph-based representations in pattern recognition, PP. 250-259, Ischia, Italy, 2001.

[Medasani et al. 2001] S. Medasani, R. Krishnapuram and Y. Choi, "Graph matching by relaxation of fuzzy assignments", Journal of IEEE fuzzy systems, Vol. 9, No. 1, PP. 173-182, 2001.

[Messmer 1995] B. Messmer, "Efficient graph matching algorithm for preprocessed model graphs", Ph.D. thesis, Institut fur informatik und angewandte mathematik, University of Bern, 1995.

[Messmer et al. 1998] B. Messmer and H. Bunke, "A new algorithm for error-tolerant subgraph isomorphism detection", Journal of IEEE pattern analysis and machine intelligence, Vol. 20, No. 5, PP. 493-504, 1998.

[Messmer et al. 1997] B. Messmer and H. Bunke, "Recent advances in graph matching", Journal of pattern recognition and artificial intelligence, Vol. 11, No. 1, PP. 169-203, 1997.

[Mckay 1981] B. Mckay, "Practical graph isomorphism", Journal of congressus numerantium, Vol. 30, PP. 45-87, 1981.

[Müller et al. 1999] S. Müller and G. Rigoll, "Searching an engineering drawing database for user-specified shapes", Conference of document analysis and recognition (ICDAR), PP. 697-700, Bangalore, India, 1999.

[Myers et al. 2000] R. Myers, R. Wilson and E. Hancock, "Bayesian graph edit distance", Journal of IEEE pattern analysis and machine intelligence, Vol. 22, No. 6, PP. 628-635, 2000.

[*N*]

[Namboodiri et al. 2004] A. Namboodiri and A. Jain, "Retrieval of on-line hand-drawn sketches", Conference of pattern recognition (ICPR), Vol. 2, PP. 642-645, Cambridge, UK, 2004.

[*O*]

[Oviatt 1999] S. Oviatt, "Ten myths of multimodal interaction", Journal of ACM communications, Vol. 42, No. 11, PP. 74-81, 1999.

[Oviatt 1997] S. Oviatt, "Multimodal interactive maps: designing for human performance", Journal of human computer interaction, Vol. 12, No. 1, PP. 93-129, 1997.

[Owens 1996] R. Owens, "Language development: an introduction", Pearson Allyn and Bacon, 1996.

[*P*]

[Park et al. 1999] J. Park and B. Um, "A new approach to similarity retrieval of 2D graphic objects based on dominant shapes". Journal of pattern recognition letters, Vol. 20, No. 6, PP. 591-616, 1999.

[Perchant et al. 1999] A. Perchant, C. Boeres, I. Bloch, M. Roux and C. Ribeiro, "Model-based scene recognition using graph fuzzy homomorphism solved by genetic algorithm", Workshop on graph-based representations in pattern recognition, PP. 61-70, Haindorf, Austria, 1999.

[Pu et al. 2006] J. Pu and K. Ramani, "On visual similarity based 2D drawing retrieval", Journal of computer aided design, Vol. 38, No. 3, PP. 249-259, 2006.

[*R*]

[Rabiner et al. 1986] L. Rabiner and B. Juang, "An introduction to hidden Markov models", IEEE ASSP Magazine, Vol. 3, No. 1, PP. 4-16, 1986.

[Rangarajan et al. 1996] A. Rangarajan and E. Mjolsness, "A Lagrangian relaxation network for graph matching", Journal of IEEE neural networks, Vol. 7, No. 6, PP. 1365-1381, 1996.

[Rich 1983] E. Rich, "Artificial Intelligence", McGraw Hill, 1983.

[*S*]

[Shearer et al. 2001] K. Shearer, S. Venkatesh and H. Bunke, "Video sequence matching via decision tree path following", Journal of pattern recognition letters, Vol. 22, No. 5, PP. 479-492, 2001.

[Shearer et al. 1997] K. Shearer, H. Bunke, S. Venkatesh and S. Kieronska, "Efficient graph matching for video indexing", In J. Jolion and W. Kropatsch, "Graph based representations in pattern recognition", PP. 53-62, 1997.

[Shinano et al. 1998] Y. Shinano, T. Fujie, Y. Ikebe and R. Hirabayashi, "Solving the maximum clique problem using PUBB", Conference of parallel processing (IPPS/SPDP), PP. 326-332, Orlando, USA, 1998.

[Shoukry et al. 1996] A. Shoukry and M. Aboutabl, "Neural network approach for solving the maximal common subgraph problem", Journal of IEEE system, .man and cybernetics Vol. 26, No. 5, PP. 785-790, 1996.

[Suganthan et al 1998] P. Suganthan and H. Yan, "Recognition of handprinted Chinese characters by constrained graph matching", Journal of image and vision computing, Vol. 16, No. 3, PP. 191-201, 1998.

[*T*]

[Tsai et al. 1983] W. Tsai and K. Fu, "Subgraph error-correcting isomorphisms for syntactic pattern recognition", Journal of IEEE system, man and cybernetics, Vol. 13, No. 1, PP. 48-61, 1983.

[Tsai et al. 1979] W. Tsai and K. Fu, "Error-correcting isomorphisms of attributed relational graphs for pattern analysis", Journal of IEEE system, man and cybernetics, Vol. 9, No. 12, PP. 757-768, 1979.

[Tate et al. 1957] M. Tate and R. Clelland, "Nonparametric and shortcut statistics in the social, biological, and medical sciences", Interstate printer and publishers, 1957.

[Tobler 1970] W. Tobler, "A Computer movie simulating urban growth in detroit region", Journal of economic geography, Vol. 46, No. 2, PP. 234-240, 1970.

[Torsello et al. 2001] A. Torsello and E. Hancock, "Computing approximate tree edit-distance using relaxation labelling", Workshop on graph-based representations in pattern recognition, PP. 125-136, Ischia, Italy, 2001.

[*U*]

[Ullman 1976] J. Ullman, "An algorithm for subgraph isomorphism", Journal of the association for computing machinery, Vol. 23, No. 1, PP. 31-42, 1976.

[Umeyama 1988] S. Umeyama, "An eigendecomposition approach to weighted graph matching problems", Journal of IEEE pattern analysis and machine intelligence, Vol. 10, No. 5, PP. 695-703, 1988.

[*V*]

[Van Wyk et al. 2002] B. Van Wyk and M. Van Wyk, "Non-bayesian graph matching without explicit compatibility calculations", Workshop on structural, syntactic, and statistical pattern recognition, PP. 74-82, Windsor, Canada, 2002.

[Van Wyk et al. 2000] M. Van Wyk and T. Durrani, "A Framework for Multi-Scale and Hybrid RKHS based approximators", Journal of IEEE Signal Processing, Vol. 48, No 12, PP. 3559–3568, 2000.

[*W*]

[Walter et al. 1999] V. Walter and D. Fritsch, "Matching spatial data sets: Statistical approach", Journal of geographical information science, Vol. 13, No. 5, PP. 445-473, 1999.

[Wang et al. 1997] Y. Wang, K. Fan and J. Horng, "Genetic-based search for error-correcting graph isomorphism", Journal of IEEE systems, man and cybernetics, Vol. 27, No. 4, PP. 589-597, 1997.

[Weiser 1998] M. Weiser, "The Future of ubiquitous computing on campus", Journal of ACM communication, Vol. 41, No. 1, PP. 41-42, 1998.

[Wexelblat 1995] A. Wexelblat, "An approach to natural gesture in virtual environments", Journal of ACM human-computer interaction, Vol. 2, No. 3, PP. 179-200, 1995.

[Wong et al. 1990] A. Wong, M. You and S. Chan, "An algorithm for graph optimal mono-morphism", Journal of IEEE systems, man and cybernetics, Vol. 20, No. 3, PP. 628-638, 1990.

[*Y*]

[Young 1992] S. Young, "The general use of tying in phoneme-based HMM speech recognisers", Conference of IEEE acoustics, speech and signal processing (ICASSP), PP. 569-572, San Francisco, USA, 1992.

Annexes

Annexe A : Modes de représentation

La perception de l'information géographique est double. Elle peut être discrète ou continue. La vue discrète permet généralement de décrire les objets géographiques ayant un contour bien délimité, alors que la vue continue se prête plus à la description de phénomènes dont la limite est parfois mal définie.

De ces deux vues de l'espace découlent deux modes de représentation (en anglais « vector » et « raster »). Ces deux modes présentent de grandes différences, en ce qui concerne leurs caractéristiques. Malgré cela, beaucoup de SIG disposent d'algorithmes de conversion d'un mode a l'autre [Demers 1997].

A. 1. Mode vectoriel (Vector)

Les données géographiques dans ce mode sont représentées à travers un ensemble de points, lignes et polygones. Pour qu'un objet soit enregistré dans un SIG, il faut que son type soit déterminé (par exemple, polygone). De plus il faut déterminer sa position dans l'espace au moyen des coordonnées du point initial (x_1, y_1) et final (x_2, y_2), les points de modification de la direction de la ligne qui l'entoure et les points qui le constituent [Demers 1997].

Points : Les points sont la manière la plus simple de représenter les objets dans l'espace. Leur dimension est zéro et leur position dans l'espace est déterminée en utilisant de simples coordonnées (paires de réels).

Lignes : Elles sont utilisées pour la représentation de nombreuses formes linéaires, comme les routes, les réseaux hydrographiques, etc. Les lignes sont reliées entre elles par des nœuds (les points du croisement). Il y existe deux possibilités pour enregistrer un réseau de lignes, elles diffèrent selon le besoin d'utilisation : (1) nœuds ou (2) liaisons. Si on s'intéresse principalement aux nœuds, on enregistre chaque nœud par ses coordonnées et les identifiants des nœuds qui partagent une ligne avec celui-ci. Quand on s'intéresse davantage aux liaisons (ce qui arrive quand on s'intéresse aussi aux directions des lignes) on enregistrera chaque liaison par un identifiant et une paire de coordonnées (points initial et final).

Polygones : Il existe de nombreuses façons de représenter les polygones [Demers 1997], dont la plus simple est le modèle « Spaghetti » qui est utilisé dans les formes les plus simples de la cartographie automatisée. D'après ce modèle, pour chaque polygone, on enregistre dans un ordre (par exemple l'ordre des aiguilles d'une montre) les coordonnées des points déterminant la surface polygonale. Le désavantage principal de ce modèle est l'enregistrement multiple des coordonnées des points constituant des lignes partagées par des polygones voisins. D'autres modèles de représentation des polygones

sont amplement utilisés, comme le modèle de « codes en chaine » et le modèle « topologique ».

A. 2. Mode matriciel (Raster)

Ce mode est généralement utilisé pour la représentation d'une variable continue, comme la température ou les précipitations (en météorologie). Les données géographiques dans ce mode sont représentées à travers de « pixels » élémentaires. Chaque unité a l'ensemble des caractéristiques de l'objet qu'elle spécifie [Demers 1997]. Selon la forme élémentaire, plusieurs modèles peuvent être cités. Le modèle le plus célèbre est celui de forme « carrée ». Les photos aériennes et satellitaires sont des exemples du mode matriciel.

Ces deux modes de représentation sont complémentaires. Une même information localisée à une position géographique pourrait être traduite dans les deux modes. Ses différentes représentations se superposent, laissant à l'utilisateur le soin de choisir en fonction de son usage la représentation qui lui convient le mieux.

Annexe B : Étude de l'adéquation des modalités d'utilisation d'un SIG

Les modalités comprennent tout type de sensation, y compris la vision et l'audition, et les différentes modes d'expression tels que l'écriture, la parole ou les gestes que les gens utilisent pour communiquer les uns avec les autres [Wexelblat 1995]. Dans la suite nous présentons les principales modalités utilisées par l'être humain pour émettre et recevoir l'information.

B. 1. Canaux de sortie de l'utilisateur

Les principaux moyens utilisés pour transmettre un message d'une personne à l'autre sont le pointage (par exemple désigner quelque chose du doigt), la parole, le dessin, les gestes et l'écriture. Ces moyens sont ordonnés selon l'ordre temporel dans lequel les gens les apprennent dans leur enfance [Owens 1996]. Le niveau de la difficulté de ces moyens augmente également selon le même ordre. Les interactions visuelles, telles que le pointage et le dessin sont des gestes universellement compris, alors que les interactions verbales, telle que la parole et l'écriture, sont liées à certaines cultures.

Pointage

Le pointage est le geste le plus naturel. Les petits enfants commencent à communiquer avec leur environnement par le pointage. En effet, il aide l'enfant à exprimer ses besoins et à formuler ses premières questions [Collins 1979]. Le pointage est employé lorsque les autres modalités échouent et lorsqu'il n'y a pas une autre manière mutuellement comprise de communication (par exemple indiquer à un étranger la direction de la poste).

Le message transmis par cette méthode d'interaction est assez simple, puisqu'elle ne permet d'indiquer qu'un objet ou une direction. Par conséquent, elle n'est appropriée que pour sélectionner un objet visible dans les interfaces, et pas pour transmettre une demande concrète d'information.

Parole

Les enfants commencent normalement à parler entre l'âge d'un an et deux ans [Owens 1996]. Au début, Ils assignent des noms aux choses et aux activités. Après, ils combinent des expressions. Et petit à petit, ils développent cette aptitude qui devient une méthode puissante et sophistiquée de communication.

La majeure limite de cette modalité est que le récepteur de l'information doit être synchronisé avec l'émetteur, sinon le contenu du message est difficile à comprendre. Pour cette raison, il est bien adapté pour la transmission de petits messages, mais pas pour les

longs ou complexes. Par exemple, dans une conférence, les paroles d'un intervenant sont difficilement assimilées si elles ne sont pas associées à un support visuel ou écrit.

Par ailleurs, la parole est une modalité séquentielle. En d'autres termes, les mots prononcés doivent se suivre dans un ordre chronologique. Ainsi, elle est bien appropriée pour décrire les événements séquentiels, tels qu'un match de football. Par contre, il peut être difficile de l'utiliser pour décrire des situations complexes, telle qu'une scène spatiale, parce que chaque objet et ses relations doivent être explicitement identifiés [Allen 1994].

Dessin (Croquis)

Les enfants commencent à s'exprimer par des dessins en même temps qu'ils commencent à s'exprimer verbalement [Levick 1998]. Au début, ils dessinent des objets simples (2-4 ans). Plus tard, ils représentent des objets dans un contexte spécifique (4-7 ans).

Comme le pointage, le croquis à main levée est une forme visuelle d'expression et une modalité universellement comprise. Bien que le dessin soit plus dépendant des outils externes (crayon, stylo, pinceau) que le pointage, il est mieux adapté pour décrire des configurations spatiales complexes. Une autre caractéristique importante des dessins est qu'ils transmettent implicitement une quantité importante d'information. Pour toutes ces raisons, le croquis à main levée est une modalité d'interaction bien adaptée pour décrire les configurations spatiales.

Écriture

L'écriture est la modalité la plus difficile à apprendre par rapport aux autres modalités présentées ci-dessus [Owens 1996]. Généralement les enfants commencent à écrire quand ils vont à la maternelle. La langue écrite se base sur un ensemble bien défini de symboles (appelés caractères). Les séquences de ces caractères forment des mots qui font des phrases lorsqu'ils sont combinés selon des syntaxes spécifiques.

Les principes de base des langues écrites et parlées sont les mêmes, surtout le débit séquentiel de l'expression verbale. Bien que la langue écrite soit plus lente que la langue parlée, elle permet de construire des structures plus complexes (cependant compréhensibles) que la parole. De plus, les gens sont plus attentifs quand ils écrivent que quand ils parlent, en ce qui concerne la grammaire et la syntaxe. Par conséquent, l'écriture est plus précise et plus expressive que la parole. Pour toutes ces raisons, elle présente le moyen de communication le plus utilisé pour interagir avec l'ordinateur. Par contre elle supporte mal la description des situations complexes (telles que les configurations spatiales), à cause de son incapacité de transmettre avec certitude des informations implicitement.

B. 2. Canaux d'entrée de l'utilisateur

La communication entre deux personnes est bidirectionnelle, c'est-à-dire qu'ils sont tous les deux émetteur et récepteur de l'information à la fois. Les canaux avec lesquels les gens perçoivent l'information sont également importants autant que les canaux de sortie. Les deux modalités principales d'entrée sont l'audition et la vue.

Audition

L'audition est une modalité séquentielle. L'oreille humaine a une excellente capacité pour distinguer les sons différents. Cependant, l'oreille humaine supporte mal la multi réception simultanée des messages auditifs. En d'autres termes, l'être humain ne peut pas parfaitement comprendre deux personnes qui parlent en même temps.

Le sens d'une phrase écoutée dépend du contexte dans lequel elle a été utilisée et de la manière selon laquelle elle a été prononcée. Les difficultés d'introduire ces paramètres à l'ordinateur rendent cette modalité moins utilisée dans l'interaction homme-machine. Cependant, c'est une modalité très intéressante pour attirer l'attention de l'utilisateur, surtout s'il est concentré sur une autre action, telle que la conduite d'une voiture.

Vue

La quantité de données qui peuvent être extraites d'une image en un clin d'œil est assez importante. C'est sans doute une des raisons qui conduit notre société à être de plus en plus visuelle [Buxton 1986]. Par rapport à l'audition, qui est optimisée pour recevoir une entrée unique, la perception optique permet de suivre plusieurs objets en même temps par balayage rapide de la portée visuelle.

La représentation visuelle est la principale modalité utilisée par l'ordinateur pour communiquer l'information à l'utilisateur. Par le biais de cette modalité, l'utilisateur peut suivre et contrôler des processus, lire les messages, suivre le curseur ou d'autres objets visuels, etc.

B. 3. Bilan sur des modalités d'utilisateur

L'interaction entre l'utilisateur et l'ordinateur est assez limitée par rapport à la richesse de formes de la communication entre les êtres humains. La plupart des systèmes informatiques ne permettent aux utilisateurs que de pointer par la souris ou de taper du texte pour exprimer leurs intentions ou leurs problèmes. Bien que beaucoup d'utilisateurs aient accepté cette situation, ils sont souvent insatisfaits.

Afin de trouver une solution à cette insatisfaction pour les systèmes de recherche d'information spatiale, nous avons présenté les modalités d'interaction et étudié leur capacité à décrire ce type d'information. Nous avons justifié le fait que le croquis est une modalité universellement comprise et bien adaptée pour décrire les scènes spatiales. De

plus sa capacité à transmettre implicitement une quantité importante d'information aide à diminuer l'effort de l'utilisateur pour exprimer ses besoins.

Par conséquent, permettre à l'utilisateur de griffonner un croquis afin d'exprimer ses besoins d'information peut être une solution à cette insatisfaction dans ces systèmes. Dans la section suivante nous présentons les intérêts d'utiliser les croquis dans l'interrogation spatiale et les différents types de requêtes qui peuvent s'exprimer par cette modalité.

Table de figures

Figure I. 1. Représentation d'un site géographique à travers un ensemble de couches thématiques 18

Figure I. 2. Exemple d'interrogation par croquis dans le système S3 23

Figure I. 3. Requête dessinée par l'utilisateur et les dessins retournés par le système 24

Figure I. 4. Représentation d'un croquis par un ensemble des lignes 25

Figure I. 5. Interface du système CBIR Tuner 26

Figure I. 6. Objet 3D dessiné en se basant sur ses vues 2D et le résultat obtenu 27

Figure III. 1. Représentation générique d'une configuration spatiale 56

Figure III. 2. Représentation d'une configuration spatiale (a) par un graphe complet (b). 57

Figure III. 3. Capture de Google-Maps d'une zone de voisinage d'un bureau de poste (Ramonville Saint-Agne 31) 58

Figure III. 4. Collection de lignes 61

Figure III. 5. Différentes situations des lignes par rapport à la droite liant leurs extrémités 61

Figure III. 6. Façon de diviser une ligne 62

Figure III. 7. Ligne contenant deux détours 62

Figure III. 8. Représentation générale d'une ligne 63

Figure III. 9. Collection de configurations géographiques 63

Figure III. 10. Orientation autour d'un point d'intersection 64

Figure III. 11. Construction d'un réseau principal 64

Figure III. 12. Modèle du réseau géographique 65

Figure III. 13. A) Image originale B) Image après le traitement C) Sous-image sélectionnée 67

Figure III. 14. REM des objets de la scène sélectionnée 68

Figure III. 15. Première étape de construction du graphe de voisinage spatial 69

Figure III. 16. Deuxième étape de construction du graphe de voisinage 70

Figure III. 17. Étapes de construction du graphe de voisinage spatial 70

Figure III. 18. Requête de l'utilisateur sans l'objet K 71

Figure III. 19. Graphe de voisinage après l'étape de renforcement 71

Figure III. 20. Modèle de couche des régions 72

Figure III. 21. Division du plein cercle en 8 angles 74

Figure III. 22. Réseau à deux échelles différentes 75

Figure III. 23. Deux arbres obtenus à la fin du processus d'appariement 76

Figure III. 24. Deux réseaux similaires 77

Figure III. 25. Réseaux principaux des réseaux présentés dans la figure III. 24 78

Figure III. 26. Représentation par graphe d'une requête et d'une configuration de la base 81

Figure III. 27. Histogramme de relations de l'objet GD1 et son analogue GR1 84

Figure III. 28. Histogramme de topologie de l'objet GD1 et son analogue GR1 84

Figure IV. 1. Trajet de l'avion qui a pris les photos 94

Figure IV. 2. Deux images représentant la même configuration à des résolutions différentes 95

Figure IV. 3. Architecture générale de notre prototype 97

Figure IV. 4. Requête de l'utilisateur représentant un réseau géographique 99

Figure IV. 5. Exemple de refus d'un réseau invalide 100

Figure IV. 6. Message pour sélectionner le type d'interrogation 100

Figure IV. 7. Résultat répondant à la requête présentée dans la figure IV. 6 101

Figure IV. 8. Exemple de requête à une échelle particulière 102

Figure IV. 9. Construction du graphe de voisinage spatial pour la requête présentée dans la figure IV. 8 102

Figure IV. 10. Exemple d'une requête multi-couches 103

Figure IV. 11. Trois couches obtenues à partir de la requête présentée dans la figure IV. 10 104

Table de Tableaux

Tableau I. 1. Trois catégories de requêtes qui peuvent être définies en utilisant le croquis 22

Tableau III. 1. Coordonnées de centres de REM des objets 68

Tableau III. 2. Matrice de distances pour la scène sélectionnée 68

Tableau III. 3. Matrice de distances relatives qualitatives 69

Tableau III. 4. Matrice de distance après la première étape 70

Tableau III. 5. Angles qualitatifs vs. Angles quantitatifs 74

Tableau III. 6. Somme des deux angles qualitatifs 79

Tableau III. 7. Représentation de la configuration GD de la figure III. 26 81

Tableau III. 8. Représentation de la requête GR de la figure III. 26 81

Tableau III. 9. Possibilités d'apparier les voisins de gd1 avec les voisins de gr1 82

Tableau III. 10. Possibilités d'apparier les voisins de gd2 avec les voisins de gr3 82

Tableau III. 11. Possibilités d'apparier les voisins de gd3 avec les voisins de gr2 82

Tableau IV. 1. Comparaison de deux approches en utilisant les mesures de Spearman et Wilcoxon 108

Tableau IV. 2. Jugement moyen de chaque croquis fait par les différents utilisateurs 109