



Vers une intégration de la temporalité dans les SIG

Christophe Claramunt

► **To cite this version:**

Christophe Claramunt. Vers une intégration de la temporalité dans les SIG. Informatique [cs].
Université de Rouen, 2001. <tel-01211264>

HAL Id: tel-01211264

<https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01211264>

Submitted on 6 Oct 2015

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.

UNIVERSITE DE ROUEN

**HABILITATION
A DIRIGER DES RECHERCHES**

**Vers une intégration de la temporalité
dans les SIG**

Christophe Claramunt

Jury

| | |
|---------------------------------|------------|
| Professeur Patrice Boursier | Rapporteur |
| Professeur Yves Guermond | Rapporteur |
| Professeur Robert Laurini | Rapporteur |
| Professeur Michel Mainguenaud | Examineur |
| Professeur Stefano Spaccapietra | Examineur |

Soutenue le 22 juin 2001

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUCTION | 4 |
| 2. MODÈLES SPATIO-TEMPORELS | 10 |
| 2.1. INTÉGRATION D'ADVERBES POUR LA DESCRIPTION DE RELATIONS SPATIO-TEMPORELLES | 11 |
| 2.2. RELATIONS SPATIO-TEMPORELLES À DIFFÉRENTS NIVEAUX D'ABSTRACTION..... | 13 |
| 2.3. BILAN..... | 16 |
| 3. REPRÉSENTATION DE PROCESSUS GÉOGRAPHIQUES..... | 18 |
| 3.1. PROCESSUS GÉOGRAPHIQUES ÉLÉMENTAIRES | 19 |
| 3.2. COMPOSITION DE PROCESSUS GÉOGRAPHIQUES ÉLÉMENTAIRES..... | 22 |
| 3.3. PROCESSUS GÉOGRAPHIQUES DE GROUPES D'ENTITÉS SPATIALES | 23 |
| 3.4. MODÉLISATION ET PROPAGATION DE CONTRAINTES GÉOGRAPHIQUES | 26 |
| 3.5. BILAN..... | 28 |
| 4. INTÉGRATION DE SIG ET DE SYSTÈMES DE GESTION DE TRAFIC URBAIN..... | 29 |
| 4.1. PRINCIPES D'INÉGRATION SIG - OUTILS DE GESTION DE TRAFIC URBAIN | 30 |
| 4.2. IMPLÉMENTATION D'OPÉRATIONS TEMPORELLES | 31 |
| 4.3. INTERFACE INTERNET | 32 |
| 4.4. BILAN..... | 33 |
| 5. MODÉLISATION, GESTION ET SIMULATION DE PHÉNOMÈNES | 35 |
| 5.1. GESTION DE CADASTRE | 36 |
| 5.2. PHÉNOMÈNES ENVIRONNEMENTAUX | 37 |
| 5.3. NAVIGATION AÉRIENNE..... | 38 |
| 5.4. NAVIGATION MARITIME..... | 39 |
| 5.5. BILAN..... | 40 |
| 6. MODÉLISATION DE RÉSEAUX ET DE STRUCTURES URBAINES..... | 41 |
| 6.1. ETUDE DE LA PROPAGATION DE LA SÉMANTIQUE DES RÉSEAUX..... | 42 |
| 6.2. ANALYSE DE STRUCTURES URBAINES | 43 |
| 6.3. BILAN..... | 45 |
| 7. CONCLUSION ET PERSPECTIVES..... | 46 |
| 8. RÉFÉRENCES | 50 |
| 9. LISTE DES ANNEXES..... | 55 |
| ANNEXES | 56 |

Résumé : Ce rapport introduit les principaux résultats des recherches réalisées par le candidat dans le domaine des Systèmes d'Information Géographiques (SIG). Le thème directeur est celui de l'extension des modèles spatio-temporels actuellement utilisés par les SIG, vers une meilleure prise en compte de la sémantique et des propriétés du monde réel. Les travaux présentés couvrent successivement des propositions d'intégration des modes de raisonnement spatiaux et temporels, et ce, à différents niveaux d'abstraction, et la prise en compte des processus géographiques comme des composants de modélisation au sein des SIG. Nos expérimentations dans le domaine de l'intégration des SIG avec des outils de gestion de trafic en temps réel sont introduites, tout comme la mise en œuvre de SIG temporels pour la modélisation de phénomènes environnementaux et urbains. Cet ensemble donne un certain nombre de repères méthodologiques pour une meilleure prise en compte de la temporalité et de la sémantique de systèmes réels dans les SIG, nous montrons que les résultats obtenus facilitent l'utilisation des SIG pour les applications dont les objectifs comprennent la compréhension ou la prévision de l'évolution d'un système géographique.

1 INTRODUCTION

L'intégration mondiale des réseaux d'échanges d'information et de communication accélère la prise en compte des changements économiques, sociaux et environnementaux, tout en accentuant l'intégration des phénomènes naturels et anthropiques, ce qui doit être répercuté dans les problématiques de la recherche scientifique pour que celle-ci conserve sa pertinence sociale. La recherche se doit donc de favoriser les approches multidisciplinaires pour étudier les relations intersectorielles dans la mesure où ces dernières sont de plus en plus importantes pour la prise de décision. Par ailleurs, afin de récupérer les acquis de la science moderne, la recherche doit se doter de moyens permettant d'effectuer une synthèse cohérente des faits observés et des connaissances acquises dans des cadres disciplinaires aussi variés que spécialisés. Le contact entre les disciplines pose plusieurs difficultés liées au problème d'intégration des concepts, des paradigmes, des modèles, des processus, des faits et des données propres à chaque domaine. La recherche interdisciplinaire doit surmonter ces obstacles pour satisfaire les besoins d'une société qui réclame une intégration cohérente des connaissances, afin de mieux modéliser et prévoir l'évolution des systèmes environnementaux, politiques et socio-économiques de plus en plus sensibles. C'est justement cette nécessité d'intégrer la connaissance du territoire pour réaliser des études intersectorielles qui explique en partie le développement de systèmes d'information géographique (SIG) pour résoudre des problèmes de gestion, d'analyse et de planification de notre patrimoine environnemental et urbain (Burrough 1986, Maguire *et al.* 1991, Laurini 1992, Goodchild *et al.* 1996), et ce, depuis les échelles locales et régionales jusqu'aux problématiques les plus globales.

Cependant, malgré un succès indéniable pour un grand nombre d'applications dans de diverses thématiques, les SIG actuellement utilisés comportent plusieurs lacunes opérationnelles qui correspondent à autant de faiblesses conceptuelles. La représentation de la dynamique de systèmes réels ou simulés posent notamment un certain nombre de problèmes importants dans la mesure où les SIG sont essentiellement basés sur une vision cartographique à deux dimensions. La composante temporelle n'est en particulier pas explicitement représentée, ce qui rend difficile les études historiques, les analyses spatio-temporelles ou la simulation de l'évolution d'un système.

La prise en compte de la dimension temporelle au sein des SIG est logiquement devenue l'un des axes de recherche les plus importants des SIG depuis le milieu des années 90. L'objectif principal de ce courant émergeant de recherche est de mieux représenter, au sein des SIG, l'évolution des phénomènes géographiques et des données qui les composent. En effet, les SIG privilégient l'aspect spatial (vue en couches cartographiques notamment) et offrent peu de solutions pour représenter, traiter et analyser la dimension temporelle (vue historique) des phénomènes (Langran, 1992). La représentation du temps dans les SIG suscite de nombreuses initiatives de recherche dans les domaines de l'informatique, de la géographie et de la géomatique. Les résultats obtenus pour l'instant portent sur la définition de modèles spatio-temporels – souvent conceptuels - de représentation de données spatio-temporelles (Langran 1992, Cheylan et Lardon 1993, Peuquet 1994, Frank 1994, Worboys, 1994, Hornsby et Egenhofer 1997) de développement de structures spatio-temporelles (index spatio-temporels) et de langages de définition et d'interrogation d'objets ponctuels mobiles au sein des bases de données (pour un inventaire récent cf. Boëlhén *et al.* 1999).

Notre démarche de recherche intègre plusieurs composants de développement de SIG temporels : les fondements spatiaux, les modèles et les outils de traitement supports de mise en œuvre de SIG temporels et d'expérimentations menées avec des thématiciens spécialistes dans leurs disciplines (Figure 1). Sur le plan des fondements, les recherches présentées incluent le développement d'outils de raisonnement spatio-temporels adaptés aux particularités de l'information géographique, l'identification de modèles réseaux indispensables pour l'analyse de structures urbaines, et la modélisation de processus géographiques. Ces travaux théoriques s'appuient sur une démarche en boucle : les concepts identifiés sont confrontés et enrichis de par leur confrontation à des domaines d'applications dont la complexité permet la validation et l'enrichissement des modèles et des outils de traitements identifiés. Notons que nos travaux se distinguent des approches et des résultats de recherche précédents sur plusieurs points : les outils de raisonnement développés intègrent les dimensions géographiques et temporelles, nous considérons la modélisation des changements géographiques mais aussi les processus géographiques qui génèrent ces changements, donnant ainsi une modélisation plus fine et plus complète de l'évolution d'un système. Ces travaux s'accompagnent également d'implémentations

logicielles sous la forme de prototypes de SIG, alors que la plupart des propositions actuelles portant sur la modélisation de données spatio-temporelles au sein des SIG se limitent souvent aux aspects théoriques sans démonstration de leur faisabilité et/ou validation dans des contextes applicatifs réels. Nos prototypes intègrent généralement toutes les phases de traitement de l'information géographique et temporelle : de l'acquisition de données en temps réel, à l'intégration de ces données dans les structures de bases de données, à leur traitement, analyse et visualisation à travers des opérateurs spatio-temporels, des outils de visualisation et des interfaces adaptées aux caractéristiques dynamiques de ces données. Enfin, les travaux présentés sont expérimentés dans des contextes d'applications réels, en liaison avec des scientifiques d'autres disciplines. Cette interaction favorise l'enrichissement des concepts proposés grâce aux différents domaines d'expertise rencontrés.

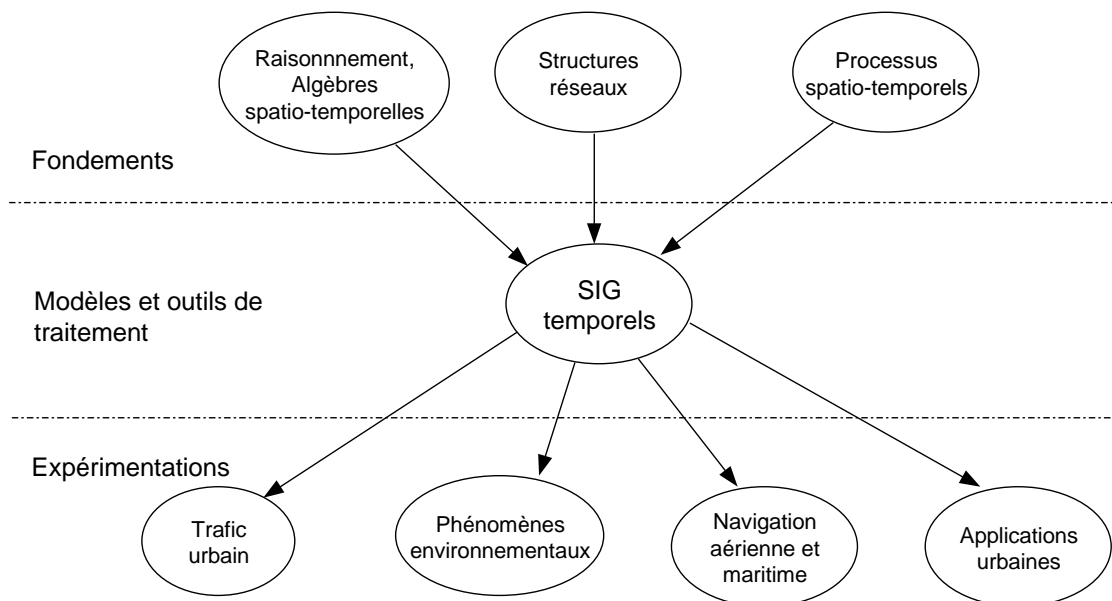


Figure 1. Démarche de recherche

Les recherches présentées dans ce rapport d'habilitation sont donc essentiellement orientées, mais non limitées à, vers l'intégration de la dimension temporelle au sein des SIG. Ils couvrent la plupart des niveaux de recherche liés à l'intégration du temps dans les SIG, de la modélisation de relations topologiques spatio-temporelles, aux langages de

traitement et à la mise en œuvre d'expérimentations logicielles et applicatives qui permettent de valider et d'illustrer le potentiel des SIG temporels auprès de domaines thématiques pertinents. Ces recherches sont basées sur des projets de recherche, des directions et codirections de thèses, et des collaborations internationales menées avec des équipes actives dans des sujets de recherche connexes. Les résultats obtenus sont validés par des publications dans les conférences et les revues du domaine.

Les domaines traités couvrent un certain nombre de composants qui sont traités en autant de sections distinctes et qui couvrent les sujets introduits par la Figure 1, en partant des fondements pour progresser progressivement vers les expérimentations thématiques et les prototypes. La section 2 introduit nos recherches menées au niveau des **modèles spatio-temporels**. Les SIG actuels sont essentiellement basés sur une vision bi-dimensionnelle de l'espace géographique (atemporelle notamment). Ce mode de représentation comporte des limitations évidentes pour étudier les processus de transformation et de diffusion qui surviennent dans les espaces géographiques. Cette représentation très sommaire de la temporalité est complètement inadaptée à une analyse de la dynamique des phénomènes, ou à une compréhension de la distribution spatiale de ces phénomènes. Elle produit des bilans globaux qui occultent les relations fonctionnelles constituant l'essence même des modèles de simulation et du raisonnement scientifique (Beller 1991, Burrough *et al.* 1996). L'intégration de la temporalité au sein des SIG passe, en premier lieu et logiquement, par une extension des modèles spatiaux actuellement utilisés au sein des SIG à la composante temporelle. Les travaux présentés tendent à intégrer (ou à étendre) les modèles spatiaux des SIG actuels avec les algèbres temporelles actuellement identifiées par les recherches en logique ou en bases de données. Ces extensions devraient permettre de nouvelles formes de raisonnement spatio-temporels adaptés aux SIG, et de meilleures perspectives applicatives. Un modèle de raisonnement spatio-temporel à différents niveaux d'abstraction, dans les dimensions spatiales et temporelles, est également proposé ; il permet une meilleure souplesse de traitement pour des applications qui nécessitent des manipulations à plusieurs niveaux d'échelle géographique et de granularité temporelle.

La section 3 présente les résultats obtenus en matière de **représentation de processus géographiques** (classification sémantique et typologie des processus spatio-temporels).

La représentation des changements au sein des bases de données spatio-temporelles doit s'accompagner, pour un grand nombre d'applications, de la description sémantique des processus qui génèrent ces changements. Les structures de données classiques conservent la description des faits observés ou mesurés mais ne comportent aucun mécanisme permettant de décrire les événements et les processus qui provoquent les changements du territoire. Cette modélisation est fondamentale pour une meilleure compréhension de ces processus naturels ou anthropiques (qualification et description de ces processus), et les études de causalités. Ce postulat a mené à une série de travaux sur une typologie spatio-temporelle de ces processus géographiques, et une approche de leur modélisation au sein des bases de données des SIG. La description logique de contraintes spatio-temporelles de processus géographiques à différents niveaux d'abstraction est également étudiée, ces contraintes sont propagées à travers les différents niveaux de description de ces processus. Ces travaux s'accompagnent de l'intégration de ces notions de processus et de leurs contraintes, au sein d'une méthode de conception de bases de données spatio-temporelles.

La section 4 développe nos recherches menées en matière **d'intégration de SIG et d'outils de gestion de trafic urbain**. La prise en compte de la dimension temporelle permet de mieux décrire la dynamique de systèmes réels ou simulés au sein des SIG. La validation et l'exploitation des modèles spatio-temporels proposés sont expérimentées dans le cadre de l'intégration des SIG avec des outils de gestion de trafic urbain. Un modèle spatio-temporel de représentation – au sens bases de données - d'un système de trafic urbain est identifié, et implémenté en liaison avec des outils de simulation développés par des groupes de recherche des universités de Nottingham et de Newcastle (deux thèses – une dirigée, une co-dirigée – sont en cours). Un prototype de SIG interactif en temps réel de visualisation de trafic urbain a été développé, il s'accompagne de l'implémentation des opérateurs temporels d'Allen au sein d'une interface d'interrogation de données spatio-temporelles. Ce prototype est actuellement étendu à une version Internet accessible à partir d'une interface web.

La section 5 présente les expérimentations réalisées en matière **de modélisation, de gestion et de simulation de phénomènes**. Les notions de processus, à partir de leur intégration dans un SIG, permettent de décrire et de modéliser des applications

environnementales, urbaines, et de navigation pour lesquelles la dimension temporelle joue un rôle significatif. Des expérimentations ont été développées dans le cadre d'études environnementales (évolution de sols alluviaux en Suisse), urbaines (historique cadastral en France, analyse de mouvements pendulaires dans la communauté urbaine de Québec), de navigations maritime et aérienne, en liaison notamment avec des partenaires de l'industrie actifs dans ces domaines.

La section 6 développe nos recherches et les résultats obtenus dans le domaine de la **modélisation SIG de réseaux et de structures urbaines** au sein des SIG. Dans le prolongement de notre travail de thèse, et de sa composante de représentation de réseaux géographiques, une recherche est développée pour l'analyse de structures urbaines à partir de concepts de la théorie des graphes et des approches dites de syntaxes spatiales. Ces modèles permettent une meilleure compréhension de l'influence des structures urbaines sur les flux et activités de centres urbains.

La section 7 présente enfin les perspectives offertes par ces résultats et les avenues de recherche qui restent encore à explorer dans le prolongement des travaux présentés, en même temps que les conclusions de ce rapport.

2 MODELES SPATIO-TEMPORELS

Les modèles spatiaux sont une importante base de fondement théorique du développement des SIG. Ils sont basés sur l'identification de propriétés géométriques et topologiques qui permettent de constituer un véritable référentiel pour le développement de fonctionnalités de traitements géographiques. L'intégration de la dimension temporelle impose une reconsidération de ces modèles spatiaux en analysant les modalités de son intégration. Si les dimensions spatiales et temporelles sont bien traitées par les outils de raisonnement, le développement de modèles spatio-temporels au sein des SIG demande en fait un réexamen de ces modèles de raisonnement, une analyse de leur compatibilité et de leur possible intégration et combinaison, et l'examen de l'impact et la faisabilité de cette intégration (ex : de nouveaux opérateurs spatio-temporels sont-ils nécessaires ?).

Les recherches présentées dans cette section s'appuient sur des principes d'enrichissement respectifs des avancées en raisonnement dans les dimensions spatiales et temporelles. Ils constituent une première étape de développement de notre concept de SIG temporel en proposant des outils qui permettent de raisonner à la fois dans l'espace et dans le temps, et ce à différents niveaux d'abstraction. Une première recherche examine la faisabilité de l'utilisation dans l'espace de l'algèbre temporel défini par Ladkin pour des intervalles non convexes, et une forme d'intégration d'opérations temporelles et topologiques dans un même canevas de raisonnement (Ladkin 1987). Notre approche permet une forme originale de raisonnement basée sur la combinaison d'opérations topologiques et temporelles sur des régions composées (notons que les régions composées correspondent à la réalité de nombreuses applications géographiques, à contrario des régions simples utilisées par la plupart des algèbres spatiales actuellement proposées). Une deuxième étape de notre recherche identifie et propose une nouvelle forme de raisonnement hiérarchique qui combine les dimensions temporelles et spatiales à différents niveaux d'abstraction (raisonner à différents niveaux d'abstraction est un procédé souvent utilisé dans les formes de raisonnement que nous utilisons naturellement dans les dimensions spatiales et temporelles).

2.1 Intégration d'adverbes pour la description de relations spatio-temporelles

Cette recherche propose une extension de l'algèbre de Ladkin vers la dimension spatiale (Claramunt 2000). A partir de l'utilisation d'adverbes, une algèbre qui qualifie les relations topologiques entre régions composées est identifiée (une région composée est formée de régions simples non connectées). Ces adverbes sont suffisamment flexibles pour décrire qualitativement les relations topologiques entre régions composées et formées d'un nombre indéfini de régions simples. Un second ensemble d'adverbes est identifié pour décrire les relations topologiques entre régions composées en évolution.

Le développement de modèles formels de description de relations spatiales est l'un des principaux domaines de récent progrès de la recherche en raisonnement spatial appliqué aux SIG. Plusieurs modèles sont proposés pour la description de relations topologiques (Egenhofer 1991, Cui *et al.* 1993, Abdelmoty et El-Geresy 1995, Clementini et Di Felice 1995) et de relations cardinales dans des espaces à deux dimensions (Frank 1992, Freksa 1992, Hernández 1994). En particulier, les relations topologiques sont essentielles pour de nombreuses opérations spatiales (ex: opérations d'intersections – *overlay* – souvent utilisées par les applications de SIG) et la gestion de l'intégrité de larges bases de données spatiales, pour ne mentionner que deux exemples de leur application parmi les plus importants. Les modèles actuellement identifiés pour la description de relations topologiques dans des espaces à deux dimensions sont, pour l'essentiel, basés sur les concepts des espaces topologiques ou de la théorie des ensembles, ou encore sur les principes de la méréologie, en d'autres termes la théorie des parts et des constituants (Cohn 1997, Vieu 1997). Ces algèbres sont cependant limitées à la manipulation d'un nombre limité de régions simples. La définition d'une algèbre de description de relations topologiques (où même cardinales) entre régions composites dans un espace bi-dimensionnel est un problème complexe, dans la mesure où le nombre de relations topologiques primitives augmente exponentiellement avec le nombre de régions simples.

Afin de permettre la manipulation d'un nombre raisonnable de relations de base, une algèbre avec un nombre limité de relations primitives est nécessaire. Une telle algèbre se doit d'être indépendante du nombre de régions simples manipulées. Les approches

actuellement proposées pour la définition de relations topologiques entre régions composées sont généralisées à partir des relations identifiées entre régions simples. Ces algèbres ne différencient pas le nombre d'occurrences des relations représentées, en d'autres termes il n'est pas toujours possible de distinguer les différentes configurations spatiales (Tryfona et Egenhofer 1997). Plus précisément, aucune distinction n'est faite entre les cas dans lesquels, une ou plusieurs ou toutes les régions simples d'une première région composée sont en relation topologique avec une, plusieurs ou toutes les régions d'une deuxième région composée. Par exemple, une relation *touch* entre deux régions composées est souvent définie par ces algèbres par au moins une relation *touch* entre une région simple, part de la première région composée, et une région simple part de la deuxième région composée, et des relations *disjoint* ou *touch* entre les autres régions simples de ces deux régions composées. Ces algèbres ne donnent donc pas une indication qualitative sur la nature des relations topologiques entre ces régions composées. Une alternative est donc nécessaire.

Notre approche est basée sur une extension de l'algèbre de Ladkin à la dimension spatiale. Cette algèbre facilite la définition de relations qualitatives pour décrire les relations entre intervalles temporels non convexes. Elle utilise des adverbes qui qualifient les relations entre intervalles temporels (ex : *partially*, *completely*). Notre extension n'identifie pas de nouvelles opérations topologiques primitives, mais qualifie les relations topologiques d'un point de vue qualitatif, et ce, dans les dimensions spatiales et ensuite temporelle (sur la base des relations topologiques d'Egenhofer). Un ensemble complet d'adverbes mutuellement exclusifs, pour une relation topologique donnée, est identifié {*never*, *mostly*, *mostly_{rev}*, *partially*, *occasionally*, *entirely*}. Ces adverbes qualifient les relations topologiques entre régions composées. Un second ensemble complet d'adverbes mutuellement exclusifs, pour une relation topologique donnée, est proposé pour la dimension temporelle {*always*, *sometimes* and *never*}. Ces adverbes, appliqués respectivement aux dimensions spatiales et temporelle peuvent être combinés pour qualifier l'évolution d'une configuration spatiale. Les adverbes identifiés sont indépendants de l'algèbre topologique de référence, un différent modèle topologique pourrait être retenu (ex : celui défini par Clementini et Di Felice 1993). Dans la mesure où les notions d'adverbes sont couramment utilisées en raisonnement commun, notre

algèbre propose une méthode qualitative et flexible d'analyse des relations topologiques pour de larges configurations spatiales. L'application de ces adjectifs est également possible pour caractériser les relations topologiques de régions simples avec « trous », ou même les relations cardinales de larges configurations spatiales.

2.2 Relations spatio-temporelles à différents niveaux d'abstraction

Les algèbres actuellement proposées pour l'étude de relations spatiales ou temporelles considèrent souvent ces dimensions de façon indépendante, et à un seul niveau d'abstraction. Nous proposons une alternative pour la description de relations spatiales et temporelles entre entités ou événements localisés dans l'espace et dans le temps – et ce, à différents niveaux d'abstraction (Claramunt et Jiang 2000). Ces relations sont modélisées à partir d'une approche hiérarchique. Une analyse hiérarchique des événements est en effet souvent employée dans de nombreuses applications de SIG (Whigham 1993). De telles décompositions sont basées sur le fait que de nombreux événements sont représentables à partir d'un calendrier de référence qui reflète la structure cyclique du temps. Un calendrier utilisé comme référence permet la définition de relations différentes de celles identifiées par des algèbres temporelles qui considèrent la dimension temporelle comme une structure linéaire. Par exemple, deux événements disjoints avec une représentation du temps linéaire peuvent très bien être « proches » selon une représentation cyclique du temps (ex : 14 juillet 1998 et 14 juillet 1999). Nous pensons donc que l'analyse de relations temporelles entre des événements ou les entités ne doit pas être limitée à une application stricte d'opérations temporelles basées sur un temps linéaire. Nous proposons au contraire une analyse de la « proximité » de ces intervalles temporels à différents niveaux de la hiérarchie d'un calendrier de référence.

Par similarité, les relations topologiques entre entités géographiques peuvent être analysées à partir d'une approche hiérarchique, l'espace pouvant souvent être organisé à partir de régions définies à différents niveaux d'abstraction (Kuipers 1996). Par exemple, deux bâtiments disjoints peuvent, ou pas, appartenir à un même quartier à un niveau d'abstraction supérieur. Le modèle identifié propose donc une représentation de relations topologiques et temporelles à partir d'une vision cyclique du temps et une représentation

hiérarchique de l'espace géographique bi-dimensionnel. Cette approche favorise une définition flexible de ces relations.

Nous utilisons à cet effet une description cyclique et hiérarchique du temps fondée sur la notion de calendrier. Un calendrier est défini comme une hiérarchie emboîtée d'intervalles temporels. Chaque intervalle temporel de la hiérarchie peut être décomposé en une somme d'intervalles temporels définis à un niveau immédiatement inférieur de cette hiérarchie (s'il existe un niveau inférieur pour l'intervalle considéré). Les mêmes principes sont appliqués à l'espace : chaque région de la hiérarchie peut être décomposée en une union de régions de l'espace définies à un niveau immédiatement inférieur de cette hiérarchie (s'il existe un niveau inférieur pour la région considérée). Ces principes sont souvent utilisés pour représenter des espaces administratifs ou politiques. Un département est, par exemple, constitué de communes, chaque commune pouvant être décrite par un ensemble de bâtiments et de parcelles. Dans l'exemple précédent, les régions de l'espace des niveaux d'abstraction supérieurs (départements et communes) constituent une partition de l'espace. Les relations topologiques qui s'appliquent donc à ces niveaux supérieurs sont *disjoint*, *touch* or *equal*. Au niveau inférieur de cette hiérarchie emboîtée, les relations topologiques valides sont non contraintes, nous utilisons pour ce niveau celles définies par l'algèbre d'Egenhofer. Analysons par exemple la relation temporelle entre deux événements e_1 et e_2 définis à partir d'un même calendrier et avec une même granularité (même niveau inférieur dans la hiérarchie du calendrier). Les relations hiérarchiques temporelles possibles sont celles définies par la combinaison des

- relations temporelles d'Allen au niveau de granularité de ces deux événements (le niveau inférieur de la hiérarchie du calendrier),
- avec les relations temporelles d'Allen suivantes (*before*, *after*, *equal*, *meets*, *met_by*) pour chaque niveau supérieur successif de la hiérarchie du calendrier. Ces relations sont celles qui correspondent à la partition du temps définie à chaque niveau supérieur de la hiérarchie du calendrier.

Afin d'illustrer le potentiel de cette approche, nous considérons l'exemple d'un événement criminel qui se déroule de 10:00 à 11:00 heures le 10 juillet 1999. Cet

événement, noté e_1 , est représenté avec un calendrier (année, mois, jour, heure), sa valeur est (1999, juillet, 10, [10:00,11:00]). Les événements qui se déroulent la même année, le même mois, le même jour et à la même heure sont évalués avec (e_1 premier opérande)

(*equal, equal, equal, equal*) opération temporelle hiérarchique

Les événements qui se déroulent la même année, le même mois, et des jours immédiatement précédents ou suivants sont évalués avec

(*equal, equal, meet \vee met_by, t-any*) disjonction d'opérations hiérarchiques temporelles.

Des motifs d'événements peuvent également être analysés. Des événements qui se déroulent le même mois sont évalués avec une opération (*t-any, equal, t-any, t-any*), le même jour avec une opération (*t-any, t-any, equal, t-any*), où *t-any* représente une des opérations temporelles possibles au niveau de la hiérarchie considérée. Ces exemples montrent la flexibilité de cette approche. La complexité du modèle est relativement limitée dans la mesure où les calendriers sont souvent définis avec un nombre réduit de niveaux. Des contraintes entre les différents niveaux de la hiérarchie et des relations temporelles possibles sont également identifiées par ce modèle.

Cette approche est également utilisée pour décrire les relations topologiques entre entités localisées et décrites selon une représentation hiérarchique de l'espace. Nous considérons par exemple un événement localisé selon une hiérarchie spatiale (département, commune, parcellaire). Les événements qui se déroulent dans le même département, la même commune mais différentes parcelles sont évalués avec

(*equal, equal, disjoint*) opération hiérarchique spatiale.

Les opérations hiérarchiques identifiées dans les dimensions spatiales et temporelles peuvent être combinées pour l'étude d'événements localisés dans l'espace et dans le temps. Cette approche est flexible dans la mesure où elle est basée sur des algèbres temporelles actuellement utilisées (l'approche proposée étant indépendante de ces algèbres en tout état de cause). Son implémentation ne pose pas de problèmes particuliers. Une application et mise en œuvre de ce raisonnement hiérarchique est

actuellement en cours dans la communauté urbaine de Québec, afin d'étudier les trajectoires de vie de la population sur une longue période. Le potentiel de cette approche est également pertinente pour des études de criminologie ou épidémiologiques pour ne mentionner que quelques exemples.

2.3 Bilan

La combinaison des dimensions temporelles et spatiales pose encore un certain nombre de problèmes pour le développement de raisonnement spatio-temporel dans les SIG. Les contributions présentées dans cette section tendent à identifier des formes originales de raisonnement spatio-temporel qui tiennent compte des besoins des applications de SIG, et qui intègrent les opérations temporelles et spatiales (c'est à dire topologiques pour ces dernières dans notre contexte) dans un canevas de raisonnement homogénéisé. Une telle démarche est complexe dans la mesure où les difficultés formelles se doublent de problèmes cognitifs (raisonner dans l'espace et dans le temps n'est pas une démarche cognitivement évidente pour de larges configurations spatio-temporelles).

Nos résultats actuels comprennent l'identification et l'utilisation d'adverbes pour qualifier les relations topologiques de larges configurations spatiales en évolution, et une méthode de raisonnement hiérarchique appliquée à des espaces temporels et spatiaux. Ces résultats peuvent être mis en perspective par rapport aux propositions actuelles de raisonnement spatio-temporel et aux outils de SIG existants. L'utilisation d'adverbes pour analyser de larges configurations spatiales se distingue des approches classiques, plus faciles de mise en œuvre, où l'on manipule des régions spatiales simples avec des algèbres qui possèdent un nombre d'opérations plus réduit. Dans ce cas il apparaît clairement que se pose la question de la complexité versus la simplicité. Dans le contexte de l'identification d'opérations spatio-temporelles hiérarchiques à différents niveaux d'abstraction, la même observation s'impose. Il s'agit dans notre cas de chercher à représenter des opérations plus fines qui correspondent à des contextes spatio-temporels possibles, que l'on se doit donc de proposer comme une alternative possible de raisonnement. On peut imaginer la cohabitation de plusieurs niveaux d'opérations spatio-temporelles selon les configurations spatio-temporelles à analyser et la nature et les objectifs des applications.

Ces recherches sont actuellement en cours de prolongement par le candidat, notamment par la définition de langages cognitifs de représentation de ces relations spatio-temporelles afin de faciliter leur perception et leur manipulation (Claramunt et Jiang, 2000), et la définition de relations de voisinages – *conceptual neighbourhoods* – entre relations spatio-temporelles. Ces dernières relations de voisinage sont fondamentales pour examiner des situations où certaines relations sont manquantes par absence de données, et l'étude de l'évolution de ces relations.

De façon générale l'intégration de formes de raisonnement spatio-temporel reste une avenue de recherche où d'autres directions d'investigation sont en cours d'apparition. Citons le développement d'outils de manipulation intégrés pour des informations géographiques et des événements représentés à différents niveaux d'abstraction et de granularité, ce que nous abordons pas pour l'instant dans nos travaux dans la mesure où nous considérons le développement d'opérateurs spatio-temporels comme une démarche progressive qui se doit dans un premier temps de définir les opérations les plus élémentaires. Dans un deuxième temps le développement de modèles spatio-temporels pour SIG devra se doubler de la réalisation d'interfaces utilisateurs et d'outils de présentation sémiologiques qui permettent de visualiser et de comprendre l'évolutions des événements et des phénomènes dans l'espace et dans le temps. Il sera également important de coupler ces modèles avec les techniques d'analyses spatio-temporelles utilisées par les sciences géographiques et statistiques notamment.

3 REPRESENTATION DE PROCESSUS GEOGRAPHIQUES

Pour être utile dans un contexte scientifique, la base de données d'un SIG temporel doit conserver d'une part, les informations factuelles décrivant les changements observés sur chacune des entités (les effets), et d'autre part, les relations entre les agents (entités actives et passives) et les processus responsables des transformations (Thériault et Claramunt 1999).

Les recherches présentées dans cette section introduisent les apports de notre recherche autour de ce sujet. Elles complètent les outils de raisonnement précédemment identifiés par une modélisation plus dynamique de l'espace géographique. Les résultats présentés abordent successivement la modélisation de processus géographiques élémentaires (Claramunt et Thériault 1995), la composition de ces processus à travers un langage logique de composition (Claramunt et Thériault 1996), et la modélisation de processus complexes qui impliquent des groupes d'entités géographiques (Thériault *et al.* 1999).

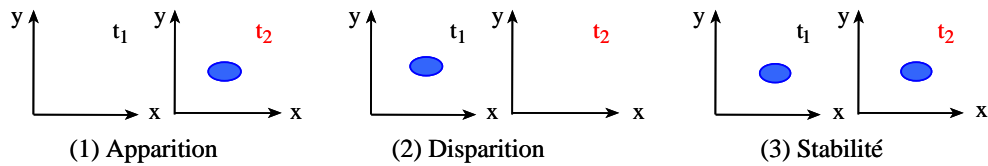
Une deuxième série de recherches est orientée vers la modélisation et la propagation de propriétés qui contraignent ces processus dans la dimension temporelle pour la description et la propagation de contraintes (Claramunt et Li 1999), et autour de la vue et de l'évolution d'entités géographiques pour leur modélisation d'un point de vue bases de données (Claramunt et Parent 2001). Précisons que ces recherches se fondent notamment sur des collaborations avec l'Université Laval et le Laboratoire de Bases de Données de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Ces recherches se sont notamment traduites récemment par une Bourse d'Excellence du Ministère de l'Éducation du Québec qui a financé un séjour du candidat à l'Université Laval au printemps 2000, et une participation comme expert international à un projet Geoide financé par le gouvernement du Canada sur l'analyse de bases de données spatio-temporelles de déplacements en milieu urbain, toujours en collaboration avec l'Université Laval et un réseau d'universités du Canada. Ces dernières collaborations se sont concrétisées par la nomination du candidat en tant que chercheur associé de l'Université Laval en septembre 2000.

3.1 Processus géographiques élémentaires

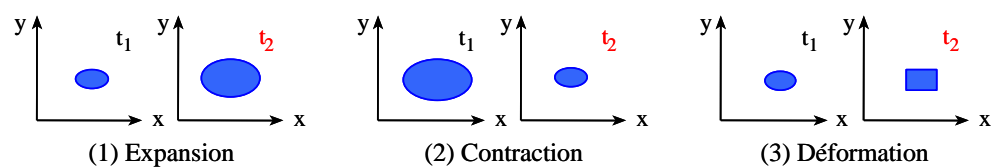
Nous présentons tout d'abord une proposition d'intégration des concepts de processus géographiques au sein des modèles de SIG, au sens bases de données notamment (Claramunt et Thériault 1995). L'objectif principal consiste à élaborer un modèle conceptuel, et implémentable, de base de données spatiales capable de décrire les relations spatiales et temporelles reliant les entités constituant le territoire, notamment les processus. Cette recherche identifie une typologie où les processus élémentaires forment trois classes fondamentales :

- ceux qui décrivent l'évolution d'une entité indépendante (Figure 2);
- ceux qui impliquent des relations fonctionnelles entre plusieurs entités interdépendantes (Figure 3a); et,
- ceux qui manifestent des restructurations territoriales impliquant des unités administratives (Figure 3b).

a) Processus élémentaires



b) Transformations



c) Mouvements

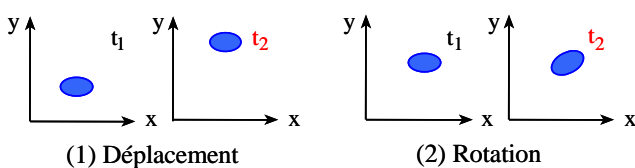
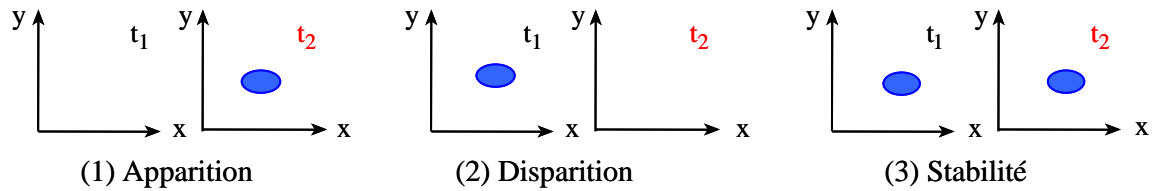
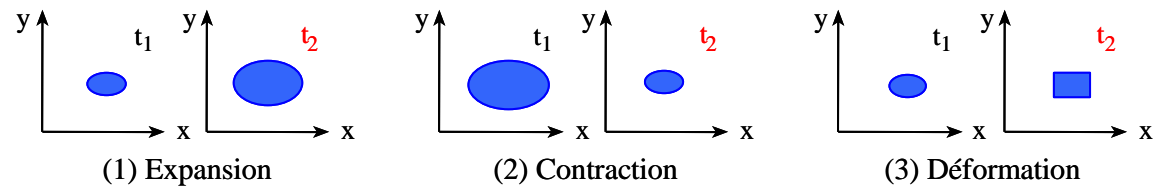


Figure 2. Typologie des processus spatio-temporels élémentaires

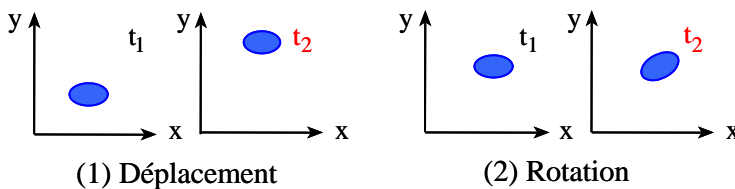
a) Processus élémentaires



b) Transformations



c) Mouvements



Notons que la stabilité est requise pour représenter l'invariance des caractères spatiaux lorsque les variations constatées concernent uniquement des attributs thématiques. A priori, un SIG temporel peut traiter une diversité quasi illimitée de relations fonctionnelles spécifiques. L'objectif de cette typologie consistant à dégager des types de processus pour organiser une base de données géographique, nous pouvons la simplifier en énonçant une règle de pertinence pour régir l'inclusion des processus spécifiques, et en regroupant ces derniers selon des caractéristiques communes. Parmi un large éventail de formes possibles, nous avons retenu des processus fonctionnels souvent utilisés dans les applications de SIG : les processus de remplacements, de succession et de diffusion. Les processus de restructuration sont pertinents pour la gestion de cadastres urbains où plus généralement toute application géographique qui comprend l'évolution d'une partition spatiale. Une première implémentation de ce modèle est réalisée à partir d'un modèle logique géo-relationnel et des opérateurs booléens de manipulation de ces processus.

Les processus géographiques constituent un concept qu'il est important de traiter lors d'une démarche de modélisation d'une base de données. Nous les avons intégrés au sein d'une méthode de modélisation de bases de données spatio-temporelles (Claramunt *et al.* 1997, 1998). Ces processus sont classifiés à travers une hiérarchie de

généralisation/spécialisation. Cette hiérarchie est extensible, ce qui donne une bonne flexibilité aux concepteurs d'applications de SIG. L'approche est basée sur un langage graphique qui décrit explicitement le schéma et les différentes catégories de processus, elle s'accompagne d'un langage de définition. Cette approche de modélisation est validée par une application de modélisation d'un cadastre.

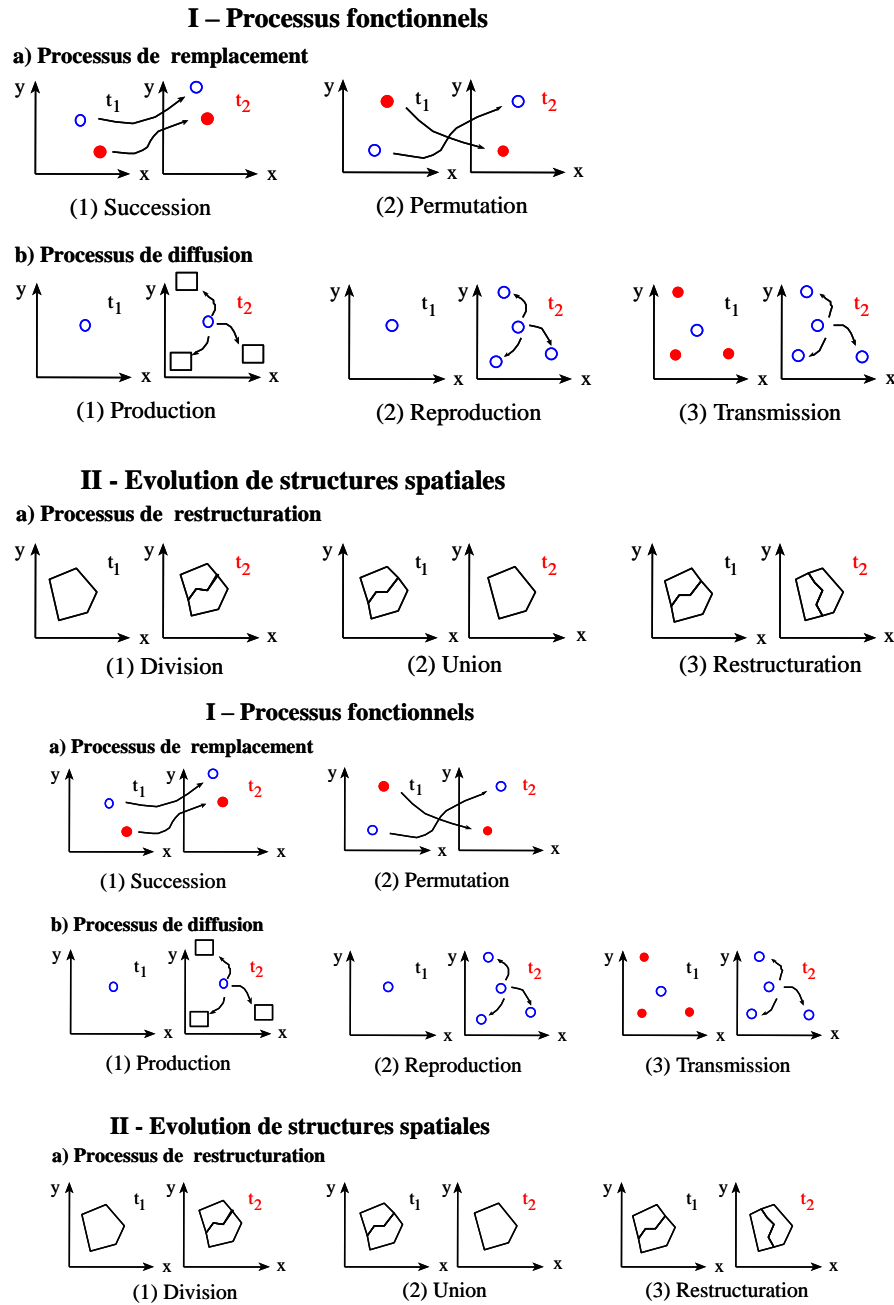


Figure 3. Typologie des processus spatio-temporels fonctionnels et de restructuration

3.2 Composition de processus géographiques élémentaires

La typologie précédente identifie des processus élémentaires qui doivent souvent être composés pour décrire les processus complexes des phénomènes naturels et anthropiques. C'est ce qui motive l'introduction d'un langage logique qui permet d'intégrer ces processus élémentaires dans un cadre sémantique cohérent, tout en maintenant une expression compatible avec l'informatisation des traitements dans le contexte des SIG (Claramunt et Thériault 1996). Une approche est proposée, elle est basée sur le langage EPL (*Event Pattern Language*) élaborée par Gehani *et al.* (1992) et reprise par Motakis et Zaniolo (1995). Ce langage comporte les opérateurs requis pour modéliser des dynamiques spatio-temporelles complexes (conjonction, disjonction, séquence immédiate, séquence relaxée).

Dans sa forme originale, le langage utilisé permet de créer des chaînes de processus et gère la temporalité qui les caractérise (succession, contiguïté, simultanéité, etc.). Cependant, sa structure temporelle est essentiellement linéaire (du passé vers le futur) et nous introduisons un opérateur supplémentaire pour représenter des cycles impliquant la récurrence d'un même patron de processus. Il peut être combiné avec les autres opérateurs. L'opérateur de cycle requiert au moins deux occurrences de la séquence de processus pour former une récurrence régulière (effets également espacés dans le temps) ou irrégulière. De plus, les manifestations successives des processus impliqués dans le cycle peuvent être séparées par toute autre série d'événements. Un tel langage permet la description sémantique de processus composés à partir des processus géographiques élémentaires identifiés. Le nombre d'opérateurs de base identifiés étant relativement réduit, l'exploitation de ce langage est facilitée, notamment pour son utilisation dans des contextes de modélisation d'applications géographiques.

3.3 Processus géographiques de groupes d'entités spatiales

L'étude et la représentation de l'évolution de groupes d'entités géographiques est un prolongement logique des travaux précédemment présentés (Thériault *et al.* 1999). De nombreuses applications de SIG nécessitent l'analyse de l'évolution de groupes d'entités spatiales liées par des caractéristiques thématiques communes, notamment pour des applications socio-économiques, de planification de transport ou épidémiologiques pour ne mentionner que quelques exemples. Nous étendons donc la typologie identifiée pour la description de processus géographiques élémentaires à la modélisation de processus géographiques de groupes d'entités, et à l'identification de paramètres spatiaux qui permettent d'identifier ces évolutions. Cette approche est basée sur deux composants :

- Une description à priori des changements spatiaux possibles. Pour les besoins de ce modèle, deux simplifications sont effectuées : (1) les entités géographiques décrites sont spatialisées à partir d'une primitive spatiale ponctuelle (simplification acceptable pour de larges groupes d'entités géographiques) et (2) la taille et l'orientation de ces entités sont sans effet au regard des distances entre entités. Dans ce contexte, les processus de vie et d'évolution qui affectent ces entités spatiales sont l'apparition, la stabilité, la translation et la disparition.
- L'évolution d'un groupe d'entités géographiques est identifiée à partir de paramètres spatiaux qui déterminent les patrons spatio-temporels de ces évolutions.

Durant une période temporelle, les processus d'un groupe d'entités géographiques sont le résultat de la combinaison des processus des entités géographiques qui appartiennent à ce groupe. Ces évolutions sont analysées à partir des paramètres spatiaux suivants (Figure 4):

- L'extension territoriale du groupe d'entités géographiques, déterminée à partir d'un polygone convexe englobant.
- La distribution spatiale de ce groupe d'entités géographiques est analysée à partir d'une analyse centrographique, et de leur arrangement interne (méthode des quadrats).

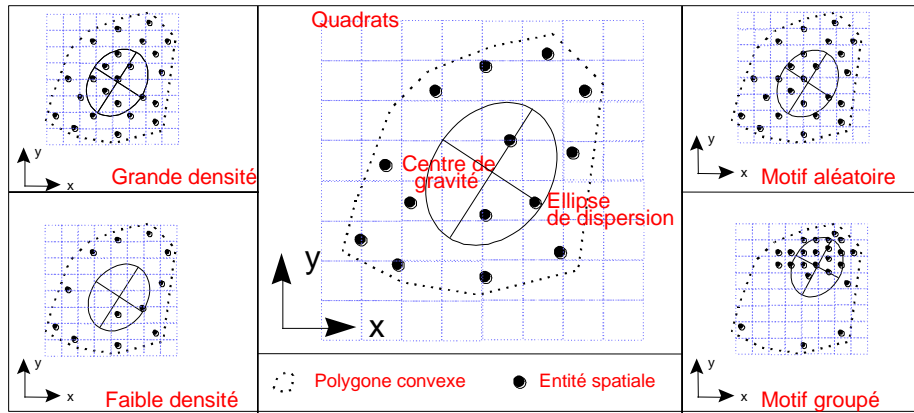


Figure 4. Paramètres spatiaux de groupes d'entités géographiques

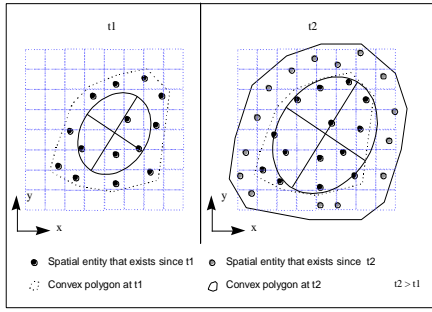
Cette approche détermine les évolutions d'un groupe d'entités géographiques à partir de leur constituants, et de leur identification à partir des paramètres spatiaux que nous venons de décrire. Nous analysons donc les conséquences de l'évolution des entités géographiques membres d'un groupe sur ce même groupe. Nous identifions deux situations particulières :

- Les changements liés à la vie des entités géographiques membre du groupe (Figure 5.I).
- Les changements qui concernent l'évolution de ces mêmes entités géographiques (Figure 5.II et 5.III).

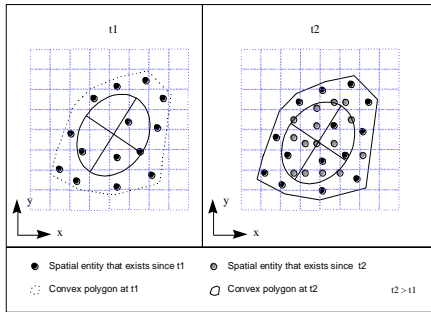
Cette taxonomie permet d'étudier l'évolution d'un groupe d'entités géographiques à différents niveaux d'abstraction : agrégé versus désagrégé. Elle permet de dégager et de spatialiser des tendances globales à partir des changement locaux. L'approche proposée est en cours d'utilisation pour une application de planification de transport dans la communauté urbaine de Québec. Les principes exposés sont également applicables à de nombreux domaines applicatifs orientés vers la modélisation de processus composés d'un large nombre d'entités géographiques.

I - Changes related to Appearance / Disappearance of individuals

a- Expansion / Contraction of the SGE

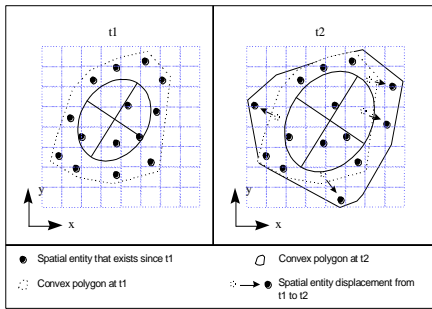


b- Progression / Regression of the SGE

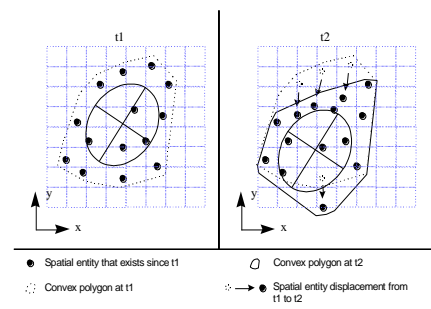


II - Changes related to Movement of individuals

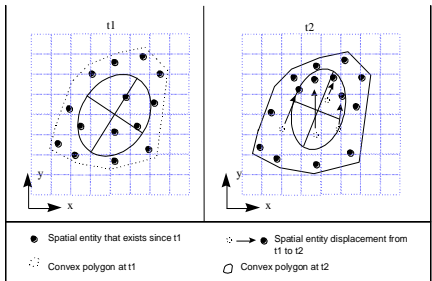
c- Spread / Concentration of the SGE



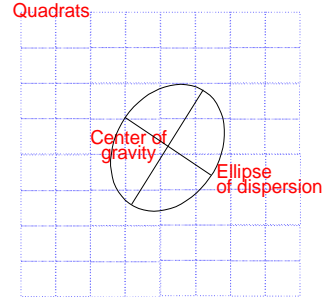
d- Deformation of the SGE



e- Internal Restructuring of the SGE

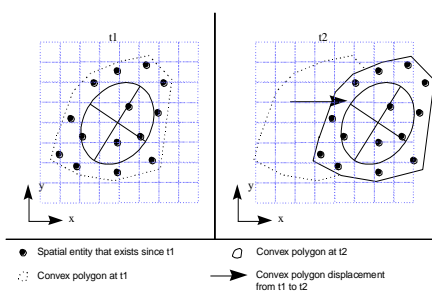


Quadrats



III - Changes related to Movement of the entire SGE

f- Overall Translation of the SGE



g- Overall Rotation of the SGE

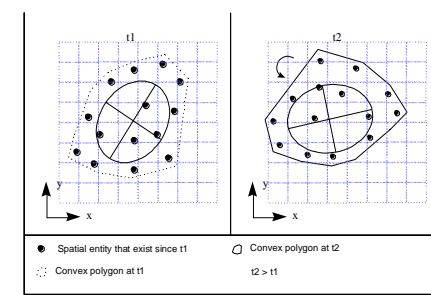


Figure 5. Taxonomie des processus de groupes d'entités géographiques

3.4 Modélisation et propagation de contraintes géographiques

Les travaux précédents introduisent plusieurs typologies de représentation de processus géographiques, élémentaires et composés, et ce, à plusieurs niveaux d'abstraction. Ces processus géographiques permettent de décrire des phénomènes du monde réel. La sémantique de ces processus s'accompagne souvent de contraintes thématiques, spatiales et temporelles qu'il est nécessaire de propager entre les différents niveaux d'abstraction utilisés. La propagation de ces contraintes est un domaine d'investigation ouvert non encore abordé dans le contexte des SIG. Nos travaux dans ce cadre s'attachent dans un premier temps, à étudier la propagation de contraintes temporelles entre processus représentés à différents niveaux d'abstraction (Claramunt et Li 1998), et à modéliser les contraintes qui concernent les entités en évolution au sein d'un schéma de bases de données (Claramunt et Parent 2000).

La propagation de contraintes est un sujet relativement bien traité par le domaine de la programmation logique. Plusieurs méthodes de résolution de contraintes sont proposées et utilisées dans de nombreuses applications en ingénierie et plus largement dans les sciences de l'information. Nous proposons l'application d'un algorithme de résolution de contraintes développé dans un cadre d'applications conventionnelles, à notre contexte de processus géographiques, et son extension vers une prise en compte de phénomènes (les processus) décrits à plusieurs niveaux d'abstraction (via le langage de composition). Cet algorithme est initialisé à partir de contraintes temporelles définies pour les processus modélisés. Des règles de propagation de contraintes temporelles sur les intervalles sont définies pour chaque opération d'agrégation de processus utilisée. L'application de cet algorithme permet de propager ces contraintes et facilite la planification de ces processus. En fait, la modélisation de ces processus à plusieurs niveaux d'abstraction reflète la plupart du temps différents niveaux de décision, du stratégique au spécifique selon les objectifs de la modélisation (Kuipers 1978). Un modèle stratégique donne une vue générale du problème (niveau de planification et de décision), un modèle spécifique donne une vision complémentaire et plus fine du phénomène décrit, afin de permettre des interventions et des actions sur le système étudié. Par conséquent, un modèle stratégique est souvent orienté vers une représentation

de processus globaux et souvent agrégés, alors qu'un modèle spécifique identifie des processus plus élémentaires (notons que d'autres niveaux d'abstraction peuvent être introduits ou même classifiés selon d'autres règles, les principes énoncés ci-après restant applicables avec quelques légères adaptations).

Nous illustrons le potentiel de cette approche à travers un exemple simplifié. Nous prenons le cas d'une liaison maritime entre deux ports. A un niveau stratégique, la liaison entre ces deux ports peut être modélisée comme un processus générique. A un niveau d'abstraction plus fin, le niveau spécifique, cette même liaison peut être décomposée par une désagrégation de ce processus en une séquence de déplacements et de stabilités dans la mesure où un ou plusieurs ports escale peuvent par exemple être modélisés. Notons également que la nature des processus représentés est une fonction de la granularité temporelle et du niveau d'abstraction. Par exemple, si un bateau est considéré en mouvement durant une période temporelle au niveau de modélisation stratégique, ce même bateau peut très bien être à l'arrêt au niveau de modélisation spécifique, mais il sera en déplacement pour au moins une « sous-période » temporelle de la période temporelle considérée (cela correspond en fait à une interprétation souple de la négation selon Allen 1984 et Shoham 1988). Un processus peut être associé à une contrainte temporelle, par exemple pour des applications de planification de transport. L'algorithme utilisé propage de façon linéaire ces contraintes à travers les différents niveaux d'abstraction, et en utilisant la description des processus agrégés à travers les opérateurs logiques d'agrégation précédemment présentés (ex : séquence). Les intervalles temporels des contraintes de départ sont successivement réduits. L'algorithme a été implémenté en C++ et testé dans un environnement de logiciel de SIG. Cette propagation de contraintes renforce l'intérêt de la modélisation de processus à différents niveaux d'abstraction, en fournissant les connections sémantiques, dans ce cas à travers la propagation de contraintes temporelles.

Si les processus géographiques sont souvent associés à des contraintes, les entités en évolution sont d'autres éléments de modélisation qu'il est intéressant d'aborder dans un contexte de SIG temporel (notons que certaines notions de modélisation proposées ci-après sont également valables dans des cas de bases de données conventionnelles). Nous faisons la distinction entre plusieurs formes d'évolutions d'entité : la migration d'une

entité entre sous-classes, la génération (versus destruction) d'une entité, et le changement de valeur de l'attribut(s) d'une entité. Cette classification se complète d'une définition et de la gestion de contraintes d'évolution au niveau de la conception du schéma d'une base de données. Nous intégrons ces contraintes au niveau du schéma afin de permettre leur gestion comme une composante à part entière de la démarche de modélisation. Ces contraintes d'évolution sont représentées comme des pré-conditions, des conditions d'exécution et de post-conditions qui restreignent l'exécution d'une évolution. Un inventaire des évolutions donne l'ensemble d'évolutions autorisées au niveau des évolutions représentées, les évolutions non autorisées sont également modélisées.

3.5 Bilan

L'intégration de la temporalité au sein des SIG à partir des concepts de processus géographiques constitue une démarche originale qui se distingue des autres recherches en SIG temporels. La modélisation des processus au sein des SIG est notamment fondamentale pour les études scientifiques de compréhension ou de prévision de l'évolution d'un système réel. Cela représente un premier pas vers l'étude des causalités qui régissent les changements du territoire et qui sont à la base des théories scientifiques. Une telle démarche combine les dimensions de représentation, de traitement et d'analyse de l'information géographique afin de fournir des cadres d'exploration de données aux scientifiques.

Notre démarche utilise une technique souvent utilisée en informatique : l'identification de briques élémentaires qui constituent un ensemble de primitives sur lesquelles s'appuient des outils de représentation et de traitement. Dans le contexte de processus géographiques, notre démarche est complexe dans la mesure où le nombre de phénomènes potentiellement représentables est pratiquement sans limites. Il convient donc d'avoir une démarche de modélisation extensible qui puisse s'adapter aux contextes des applications étudiées. Plus généralement les recherches actuelles s'attachent essentiellement à la description des changements possibles sans s'attarder pour l'instant sur la nature des processus ou même des causalités qui induisent ces modifications de l'espace. Nous pouvons aussi remarquer de grandes difficultés opérationnelles d'intégration de la temporalité dans les outils de SIG actuels. Plusieurs raisons peuvent

être évoquées : à notre avis le manque de concertation entre les différentes équipes actives dans ces thématiques est une première explication (le nombre relativement réduit d'équipes renforce ce constat). Nous pensons également que l'absence de projets de recherche pluridisciplinaires en SIG temporels est un obstacle au développement de solutions réellement pertinentes pour les disciplines et domaines concernés.

Nous prévoyons de notre côté approfondir l'étude des processus géographiques en allant à la rencontre des scientifiques dans différentes thématiques afin d'affiner les typologies actuellement identifiées, et en développant des collaborations avec les collègues informaticiens actifs dans des thèmes proches ou connexes. Les processus du monde réel ne sont en effet pas toujours décomposables en primitives élémentaires, leur degré de complexité est également bien souvent plus élevé. Une telle démarche en amont doit se doubler de l'investigation de nouvelles structures et méthodes opératoires (langages de manipulation, de traitement et d'analyse) qui permettent d'exploiter toute la sémantique de ces processus complexes. Mentionnons enfin le besoin d'explorer des outils de visualisation et d'animation qui reconstituent la complexité des phénomènes représentés.

4 INTEGRATION DE SIG ET DE SYSTEMES DE GESTION DE TRAFIC URBAIN

Les SIG actuels ne possèdent toujours pas l'ensemble des caractéristiques techniques et des modèles d'intégration de données qui permettent de véritables communications fonctionnelles avec les outils de traitement de données géographiques en temps réel. Ce faible niveau d'intégration est accentué par les différents paradigmes utilisés par les SIG et les modèles de traitement de données en temps réel, et le fait que toute tentative d'intégration véritable nécessite pratiquement une nouvelle conception des systèmes logiciels existant (Abel *et al.* 1997). C'est notamment le cas des systèmes de gestion en temps réel de trafic urbain dont les fréquences de mises à jour sont souvent de l'ordre de la seconde afin de maintenir une vision réelle du système. Notre recherche tend à explorer les bénéfices et la faisabilité d'une intégration fine entre un système de gestion en temps réel de trafic urbain et un SIG.. Parmi les objectifs poursuivis, le SIG doit pouvoir constituer une mémoire du système représenté, un outil de visualisation interactif, un moteur d'analyses spatiales, et un système qui intègre les données de trafic urbain comme une composante à part entière d'une banque de données urbaines. La dimension temps réel de cette recherche constitue une direction importante pour le développement d'un concept de SIG temporel dans la mesure où les volumes de données et les besoins de traitement apportent des problématiques importantes qu'il convient d'explorer (citons par exemple le suivi en temps réel ou l'analyse de larges volumes de données spatio-temporelles).

Ces recherches sont basées sur une collaboration entre le département d'informatique de la Nottingham Trent University et le centre de contrôle de trafic de la ville de Nottingham. Cette collaboration s'appuie sur des diplômés d'ingénieurs (notamment les travaux de Patrick Valsecchi), des projets de master dirigés (en particulier le développement de Marius Grzywacz), une thèse dirigée (soutenance prévue en juin 2001, Kalin Penev) et une thèse co-dirigée en liaison avec l'Université de Newcastle (soutenance prévue en septembre 2001, Adam Etches). Nos développements les plus récents dans ce domaine dans la direction de la diffusion de données trafic dans un environnement Internet sont basés sur une collaboration avec les universités de Keele en Grande-Bretagne et de Gävle en Suède.

4.1 Principes d'intégration SIG – outils de gestion de trafic urbain

Nous introduisons le prototype OSIRIS conçu comme un système interopérable d'intégration de système de gestion de trafic et de SIG (Inter-Operable System for the Integration of Real-time traffic data within GIS) (Etches *et al.* 1998, Valsecchi *et al.* 1999, Claramunt *et al.* 2000). Le prototype OSIRIS est techniquement basé sur une série de composants logiciels qui constituent une chaîne complète de traitement de données de trafic urbain, de l'intégration de données aux outils de visualisation et d'animation. Les données sont importées en temps réel à partir du système de contrôle de trafic urbain SCOOT. Le logiciel SCOOT est un système macroscopique de gestion de trafic urbain développé à l'origine par un consortium de recherche en Grande-Bretagne, il permet principalement la coordination des cycles de feux tricolores. SCOOT modélise les propriétés du trafic urbain (ex : longueur de la file d'attente à un feu tricolore), à contrario d'un système microscopique qui modélise les véhicules individuels. Dans le contexte de notre prototype, ce système fournit un certain nombre d'indicateurs des propriétés du réseau de trafic urbain, sous la forme d'attributs thématiques qualifiés temporellement. Ces données sont intégrées dans un système de communication informatique à partir du système à mémoire distribuée DIME développé par la Nottingham Trent University (Distributed Memory Environment system (DIME)). DIME permet la distribution de ces données trafic en temps réel vers un certain nombre de clients, à partir de réseaux locaux ou externes. Ce système de communication est basé sur le protocole TCP/IP et une architecture client-serveur.

La granularité temporelle donnée par DIME est de l'ordre de la seconde. Les volumes de données résultant sont donc très larges (environ 1 million de messages par jour). Afin de réduire ces volumes de données, nous avons développé et implémenté un outil logiciel et interactif d'agrégation de données. Le premier niveau d'agrégation génère des données pour des intervalles temporels de l'ordre de la demi-heure. Cette granularité est satisfaisante pour nos objectifs d'analyse à posteriori du réseau de trafic urbain. Ces fonctions sont implémentées sous la forme d'un pré-processeur qui calcule des moyennes et des maximums pour les différents paramètres de trafic. Ce pré-processeur joue le rôle d'un client pour le système DIME, et d'un serveur de données pour le SIG. Le SIG est en mesure de recevoir ces données en mode continu ou discontinu. Différents niveaux

d'échelle géographique (échelles locales ou schématiques : au niveau des voies, des tronçons ou des carrefours) et de granularités temporelles sont utilisables pour les opérations de traitement au sein du SIG (l'utilisateur peut définir ses propres granularités temporelles). Les données dérivées sont intégrées et gérées par le SIG, ce qui permet la réalisation des opérations de visualisation et d'analyse requises par l'utilisateur. Des outils interactifs de visualisation et d'animation constituent l'interface principale de traitement. Ces fonctions permettent la visualisation et l'animation des données dans les dimensions spatiales, thématiques et temporelles. Ces fonctions interactives permettent une analyse et une exploration des conditions de trafic, ils supportent également l'analyse des effets d'incidents dans le réseau sur les conditions de trafic ou de points critiques dans le réseau, et l'études de l'impact de ces conditions de trafic sur l'environnement et la santé (pour mentionner quelques exemples). Le prototype OSIRIS a été testé et validé en liaison avec le centre de contrôle du trafic des villes de Mansfield et de Nottingham en Grande-Bretagne. Les principes retenus pour son développement sont également utilisés par une recherche de doctorat à l'Université de Newcastle (co-dirigée). Cette recherche est réalisée en liaison avec la compagnie de développement de SIG Smallworld. Une deuxième thèse est en cours à Nottingham (dirigée), cette thèse a pour objectif de renforcer et de consolider les fonctions d'OSIRIS, avec notamment des extensions vers les outils de simulation de trafic urbain.

4.2 Implémentation d'opérations temporelles

Le prototype OSIRIS est étendu dans un deuxième temps par l'intégration d'opérations temporelles qui complètent son éventail de fonctionnalités (Grzywacz et Claramunt 2000, master encadré). Les SIG actuels ne gèrent pas en effet la composante temporelle explicitement au sein des modèles de données proposés. L'idée de base de cette recherche est d'identifier une structure logique de description et de représentation d'attributs temporels (types temporels), et d'opérateurs de manipulation de ces attributs. Cette recherche est effectuée dans le cadre d'un travail de master encadré. Une évaluation des principaux modèles temporels de bases de données est réalisée, nous avons retenu une approche duale qui combine une approche en première forme normale (1NF) avec les opérations temporelles identifiées par TSQL2.

Cette solution présente l'avantage de la compatibilité avec les modèles géo-relationnels actuellement utilisés par les logiciels de SIG. Notre approche est implémentée, elle se complète d'une interface qui intègre les opérations temporelles et les prédicats temporels au sein d'un outil logiciel d'interrogation de données géographiques et thématiques. Le prototype est validé dans le contexte de notre application de trafic urbain, un certain nombre d'interrogations temporelles représentatives sont évaluées et testées.

4.3 Interface Internet

La diffusion en temps réel de données géographiques vers un plus large public est un objectif important pour les applications dont l'impact dépasse leurs missions internes de gestion ou de planification (Claramunt *et al.* 2001). Un exemple relevant est celui des applications de gestion de trafic en temps réel dans la mesure où de nombreux services, ou mêmes particuliers, sont particulièrement intéressés par une meilleure connaissance des conditions de trafic d'une zone considérée ou de la faisabilité d'un déplacement. Dans le contexte de nos recherches et développements en matière d'intégration de système de gestion de trafic et de SIG, l'Internet donne un support adapté à la diffusion de ces données de trafic urbain (d'origine ou dérivées), permettant ainsi une extension potentielle importante en terme d'impact auprès d'une plus large communauté d'utilisateurs. Une telle extension favorise également une meilleure valorisation de notre combinaison logicielle d'un système de gestion de trafic avec un SIG. Cet objectif demande cependant une meilleure liaison dynamique et fonctionnelle entre le SIG, intégrateur de données de trafic, et le réseau Internet. Un tel développement reste encore à affiner et à développer dans la mesure où les applications de visualisation de données de trafic sur Internet sont bien souvent relativement statiques sur le plan des fonctionnalités (mise à jour régulière de cartes de trafic, sans possibilité d'interaction avec ces données pour l'utilisateur).

Notre recherche propose une interface Internet basée sur la technique des *servlet* Java et intégrée avec une machine virtuelle Java localisée sur le serveur SIG. Une collaboration entre les universités de Nottingham, Keele en Grande-Bretagne, et Gävle en Suède constitue le moteur de ce projet. L'interface Java est connectée sur demande à un

servlet Java résident sur le serveur. Ces principes permettent une collaboration dynamique durant toutes les phases de visualisation et d'analyse des données de trafic. Le servlet Java a plusieurs rôles : celui de transmettre les commandes utilisateurs de l'interface Java vers le pré-processeur de données de trafic ou le SIG, d'activer les opérations d'importation de données trafic à partir du SIG, de propager ces données vers le client Java, et finalement de déclencher sur demande les opérations de visualisation requises au niveau de l'interface utilisateur (notons que l'application développée reproduit pratiquement les fonctions de visualisation et d'animation implémentées dans l'environnement SIG et précédemment décrites). Ce prototype complète nos précédents travaux et ouvre un certain nombre d'options fonctionnelles additionnelles dans la mesure où l'intégration SIG – système de gestion de trafic urbain ouvre la voie à de nombreuses explorations et analyses des propriétés du réseau urbain, et ce, dans leur contexte géographique. Parmi les fonctions qui restent encore à explorer, citons le développement d'algorithmes de calcul de plus courts chemins ou de parcours déterminés à partir de critères thématiques et temporels. Les mêmes développements restent à explorer dans un contexte multi-réseau (par l'intégration des réseaux de bus ou pédestres par exemple). Le composant SIG devrait également permettre de développer des applications tiers dans lesquelles les conditions de trafic jouent le rôle d'un paramètre déterminant, notamment les études environnementales et de santé en milieu urbain.

4.4 Bilan

L'intégration de systèmes de gestion de données en temps réel et de SIG constituent un domaine ouvert de recherche, actuellement en plein essor. Les applications thématiques sont nombreuses, de la gestion de trafic, à la surveillance de conditions environnementales, ou encore au transport de matières dangereuses. Cette intégration demande la combinaison des fonctionnalités de systèmes en temps réel, des SIG et d'outils de communication ; cet ensemble constitue un domaine de recherche émergent au sein des SIG (Laurini 2000).

Le domaine de l'intégration des SIG et des outils de simulations est encore embryonnaire. Il est important de noter que la large communauté scientifique de la simulation, tout en notant l'intérêt potentiel des SIG, reste encore à convaincre sur la

démonstration des apports. Le signe de la maturité des SIG vis à vis du domaine de la simulation viendra à notre avis de son intégration comme un thème où une composante des recherches de la simulation.

Nos recherches dans ce cadre sont essentiellement centrées vers l'intégration de systèmes en temps réel de gestion de trafic urbain avec les SIG. Nous couvrons les différentes composantes nécessaires à cette collaboration : de l'intégration de données en temps réel, à leur agrégation, à leur représentation et stockage, à leur visualisation et animation au sein d'un SIG, et à leur diffusion via une interface web. Plusieurs composantes restent encore à consolider : les modèles et structures de données, les outils de visualisation et d'analyse de ces larges volumes de données générées. Nos travaux actuels se sont principalement orientés vers des outils de gestion de trafic urbain, nous pensons poursuivre nos recherches dans la direction d'outils de simulation, de trafic urbain dans un premier temps, en espérant dans un deuxième temps étendre nos acquis vers d'autres domaines applicatifs également dans un contexte en temps réel.

5 MODELISATION, GESTION ET SIMULATION DE PHENOMENES

La modélisations et la simulation de phénomènes environnementaux et urbains fournissent des contextes de validation et d'enrichissement privilégiés des recherches précédemment présentées dans la mesure où les phénomènes à décrire sont de natures complexes et variés. Nous avons tenté de valider et enrichir nos travaux dans des contextes variés sur le plan des thématiques et des problématiques: à caractère légal ou scientifique, et aux échelles spatiales et granularités temporelles aussi différentes que possible.

Les recherches présentées dans cette section introduisent successivement une application légale dont la complexité essentielle provient de la gestion historique des données (Sperry *et al.* 2001), notamment du point de vue des bases de données (5.1 gestion de cadastre, thèse soutenue avec participation à la direction en liaison avec le LIRMM à Montpellier), une application environnementale analysée à plusieurs niveaux d'échelle, sur une période temporelle pratiquement centennale (Mendonça et Claramunt 2001), et avec une combinaison de différentes méthodes d'analyses spatio-temporelles des données sols (5.2 modélisation de sols alluviaux, thèse co-dirigée et soutenue en liaison avec l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne). Nous présentons ensuite une application qui combine les deux dimensions de l'espace géographique avec la troisième dimension spatiale et la dimension temporelle, la problématique étant notamment celle de l'acquisition et le traitement de données de navigation aérienne (Knighton et Claramunt 2001), et de leur visualisation et animation à partir d'une interface aussi réaliste que possible pour le pilote (5.3 navigation aérienne, recherche de diplôme encadrée et collaboration avec l'aéroport d'East Midlands en Grande-Bretagne). Le dernier exemple présenté est celui de la gestion concurrente de processus de navigation maritime (Barbe *et al.* 2001), il s'agit dans ce cas d'identifier et de modéliser les règles de gestion concurrente de navigation, et de proposer un outil didactique qui reproduise les différents conflits et solutions de navigation dans un contexte de prototype démonstrateur (5.4 navigation maritime, travaux de diplôme d'ingénieur encadrés en liaison avec l'Ecole Navale en Bretagne)

5.1 Gestion de cadastre

Cette recherche propose un modèle de méta-données pour la gestion de changements cadastraux (Spéry *et al.* 2001). La solution proposée permet la description des changements cadastraux et leur identification à posteriori à partir des planches cadastrales numériques fournies par le producteur des données. Les changements cadastraux possibles sont identifiés à partir de leur vraisemblance légale. Ils sont classifiés en changements géographiques élémentaires (division, union, extraction, passage et rectification) et changements géographiques complexes (restructuration, expropriation). De ce point de vue, cette classification constitue une prolongation de nos recherches précédentes dans le domaine des processus spatiaux-temporels.

Les changements cadastraux sont représentés avec les parcelles impliquées, et associés aux documents sources générateurs de ces changements. Un arbre de filiation (graphe acyclique) supporte la mise en œuvre d'interrogations historiques et l'identification des changements cadastraux. Chaque changement cadastral identifié par notre classification est associé à un sous-graphe type, ce qui permet de retrouver les différents cas de figures en analysant la « trace » des identifiants des parcelles impliquées à travers le graphe. Le schéma proposé est implémenté à partir du SGBD orienté-objet O2, les interrogations utilisées par notre modèle d'identification des changements à partir d'O2QL.

Le modèle proposé est appliqué au cadastre français, les principes identifiés sont néanmoins extensibles à d'autres cadastres nationaux. La recherche développée se distingue des travaux précédents dans le domaine cadastral dans la mesure où aucune méthode n'avait été développée jusqu'à présent, à notre connaissance, dans le domaine de l'identification de changements cadastraux, et de leur qualification sémantique, à partir de la fourniture des seules planches cadastrales numériques.

5.2 Modélisation de phénomènes environnementaux

L'analyse de l'évolution de sols alluviaux est une problématique importante en science des sols. Les composantes temporelles et géographiques, en plus du domaine d'expertise des sols, sont essentielles pour l'étude de ces phénomènes. La recherche présentée introduit une approche intégrée (au sens de la combinaison de différentes méthodes d'analyse de données spatio-temporelles) pour l'analyse de l'évolution d'une couverture des sols en milieu alluvial (Mendonça et Claramunt 2001). L'étude combine une analyse quantitative des changements géographiques, avec une modélisation à priori des processus géographiques possibles à la base de ces changements. Une analyse spatiale quantitative donne des indices d'évolution entre les différentes catégories de sol dans la région d'étude (une région alluviale en Suisse Romande). L'étude de la nature des changements produits est effectuée avec une analyse des processus géographiques qui expliquent la généalogie des changements. Ces processus et changements sont observés à différents niveaux d'abstraction et sur plusieurs périodes temporelles successives. L'ensemble permet une meilleure compréhension des processus qui régulent l'évolution des catégories de sols dans l'espace et dans le temps. Dans un deuxième temps, ces résultats permettent la génération d'hypothèses d'explication sur la nature et les causalités des changements environnementaux observés dans cette région pendant la période d'étude. Les processus géographiques observés sont identifiés et classifiés, aux niveaux élémentaires et agrégés. Au-delà des résultats pertinents pour la problématique des sols, c'est à dire une meilleure compréhension de ces changements et des processus, cette recherche permet d'identifier un certain nombre de processus géographiques agrégés, et l'introduction de niveaux d'échelle complémentaires dans la modélisation des processus géographiques. Les interrelations sémantiques entre processus géographiques décrits à différents niveaux d'abstraction et d'échelle ouvrent de nombreuses possibilités de recherche dans la mesure où la modélisation de ces liens reste encore complexe et non complètement stabilisé (notamment au niveau des opérateurs logiques nécessaires) L'ensemble des approches présentées, analyse quantitative et modélisation des processus, ont été implémentées et expérimentées dans un environnement de SIG. Ils constituent également une référence méthodologique pour d'autres études de compréhension de l'évolution de l'environnement.

5.3 Navigation aérienne

L'utilisation des SIG pour la navigation aérienne reste encore un domaine pratiquement inexploré pour les applications civiles. De telles applications sont encore difficiles de développement pour les SIG actuels dans la mesure où leur mise en œuvre nécessite la gestion de la troisième dimension géographique, et ce, en temps réel, et l'intégration de toute une série de paramètres de vol enregistrés à partir d'outils de haute technicité et de connexion difficile avec un environnement de logiciel de SIG standard.

La recherche réalisée propose un nouvel environnement et prototype pour le debriefing de pilotes en formation après un vol d'entraînement (Knighton et Claramunt 2001). Le prototype implémenté est basé sur l'intégration d'un système de communication de données de vol, avec un environnement informatique embarqué. Cette architecture permet l'acquisition des données de vol et leur exploitation à posteriori. Une interface graphique interactive et visuelle reproduit les conditions de vol et les différents outils de contrôle utilisés permettant ainsi une bonne communication entre l'instructeur et le pilote en formation durant la procédure de debriefing, augmentant ainsi le bénéfice de cette discussion pour le pilote et le formateur. L'environnement informatique développé comporte plusieurs interfaces de communication qui permettent l'acquisition en temps réel de la position géographique, de l'altitude et du déplacement relatif de l'avion. Un micro-contrôleur constitue le nœud de contrôle de ces outils d'acquisition de données à partir d'un port série standard aux environnements microinformatiques. Ce prototype a été implémenté et testé en vol, en liaison avec le département d'ingénierie de l'aéroport d'East Midlands en Grande-Bretagne. Les extensions fonctionnelles à envisager concernent le développement d'une échelle plus fine de contrôle pour les procédures de décollage et d'atterrissage, l'aide à la navigation et le développement de systèmes d'alerte (ex : altitude mesurée en deçà de celle autorisée) Les perspectives de développement sont nombreuses, citons l'extension de l'outil vers une utilisation par des pilotes expérimentés. Ce développement nous permet également d'explorer les phases essentielles d'acquisition de données spatio-temporelles en temps réel, une phase bien souvent considérée comme acquise mais à la complexité réelle.

5.4 Navigation maritime

Au même titre que les applications de navigation aérienne, la navigation maritime constitue un domaine encore ouvert pour les applications et les recherches en SIG. D'importantes initiatives sont en cours pour intégrer la cartographie maritime avec des systèmes d'aide à la navigation. A partir de ces progrès bien souvent institutionnels, de nouvelles perspectives applicatives et de recherches liées au développement de ces dernières sont ouvertes. En particulier le développement de systèmes intelligents d'aide à la navigation concurrente est une piste de recherche pertinente. Il s'agit dans ce cas de modéliser les règles de navigation qui ont l'avantage d'être régies par des codes internationaux de navigation, et de proposer les décisions de navigation appropriées à des configurations maritimes données.

Cette recherche introduit une nouvelle approche logicielle pour la simulation de déplacements de bateaux et la gestion des risques de navigation (Barbe *et al.* 2001). Le prototype développé intègre une base de données maritime standard (constituée notamment de données bathymétriques), et un modèle de simulation qui représente un certain nombre de bateaux, leurs propriétés, les déplacements prévus et calculés. Ce prototype est développé à partir d'un environnement de logiciel de SIG standard. Les règles de navigation sont explicitement décrites et codées à partir d'algorithmes qui analysent les différentes configurations maritimes possibles, et les décisions de navigation qui en résultent. Les algorithmes implémentés ont pour objectif d'éviter les collisions et les échouages. Le prototype est validé à partir d'un certain nombre de configurations types déterminées par l'utilisateur (nombre, position et propriétés des bateaux modélisés). Les perspectives d'extension de ces travaux concernent l'intégration du prototype avec des senseurs (radar, GPS) afin de passer à une phase opérationnelle et non de simulation, et une collaboration avec les systèmes électroniques de navigation cartographique.

5.5 Bilan

La mise en œuvre de SIG temporels dans le contexte d'études scientifiques, de gestion en temps réel ou sur des plus longues périodes, constitue un domaine expérimentation privilégié qui favorise une meilleure maîtrise des besoins et des objectifs à poursuivre dans le contexte du développement de nos recherches. Les travaux que nous avons menés se caractérisent tout d'abord par leur diversité thématique, et par le fait qu'ils combinent des propositions théoriques avec des expérimentations pratiques et des implémentations logicielles. L'ensemble ayant pour objectif de permettre un meilleur réalisme des recherches menées et de leurs résultats. Cette direction de recherche est inépuisable dans la mesure où le nombre de phénomènes représentables est pratiquement infini. Nous pouvons même imaginer l'extension de ces travaux à des processus non géographiques, mais spatiaux dans leur essence, où même leur confrontation à des espaces multidimensionnels mais sans caractères géographiques ou spatiaux intrinsèques.

Nos futurs objectifs en la matière consistent dans un premier temps en la poursuite de ces expérimentations en approfondissant les thématiques actuelles ou en identifiant de nouvelles problématiques pertinentes. Ces applications permettent de valider et de consolider nos approches plus théoriques. L'exemple de la gestion du cadastre est significatif dans la mesure où il permet de raffiner notre classification de processus spatio-temporels. A un autre niveau la recherche environnementale menée avec Lou Mendonça permet d'identifier de nouveaux processus spatio-temporels à une échelle plus régionale et de commencer à modéliser les relations entre processus géographiques identifiés à différents niveaux d'abstraction. Un deuxième objectif plus en aval est celui de l'industrialisation de nos prototypes dans la mesure du possible. L'exemple de la navigation aérienne, et du prototype présenté, donnent une implémentation logicielle pas très loin de la mise en œuvre d'un projet véritablement industriel.

6 MODELISATION DE RESEAUX ET DE STRUCTURES URBAINES

La représentation de réseaux au sein des SIG est une composante essentielle pour développer les opérations de graphe nécessaires aux développements de fonctions d'optimisation de parcours et d'analyse de réseaux de distribution ou encore à la mise en œuvre d'études morphologiques et du fonctionnement de structures urbaines. Ces derniers cas relèvent de réseaux physiques, des applications similaires sont également envisageables pour modéliser des réseaux « immatériels », des réseaux d'influences ou de communication notamment. Afin de posséder un véritable pouvoir de traitement au sein des SIG, la composante réseau nécessite encore une meilleure intégration au niveau des modèles de données spatiaux support, et des opérations de traitement. Parmi les récents progrès dans ce domaine, citons l'intégration des notions de réseaux au sein des bases de données spatiales et une identification d'opérations réseaux élémentaires (Güting 1994), et une série de recherches orientées vers une meilleure compréhension de la sémantique de ces réseaux, notamment à plusieurs niveaux d'abstraction, et de la propagation des propriétés sémantiques des réseaux à travers l'application de fonctions de graphe (Mainguenaud 1995, 1997).

Nos recherches dans ce contexte, et dans le prolongement du travail de thèse, portent également sur l'intégration des réseaux au sein de bases de données, notamment à travers le concept de vue spatiale (Claramunt 1998). Les travaux plus récents présentés dans cette section présentent tout d'abord une analyse de la propagation des propriétés sémantiques des réseaux à travers l'application d'opérations de graphe, en particulier à partir des composants fondamentaux des réseaux : les nœuds, les liens et les réseaux (Claramunt et Mainguenaud 1999). Une deuxième recherche porte sur l'utilisation des notions de réseau pour modéliser des structures urbaines et l'identification de paramètres spatiaux qui permettent une analyse de l'influence de la morphologie urbaine sur le fonctionnement de ces structures urbaines (Jiang et al. 1999, Jiang *et al.* 2001). Cette dernière contribution porte également sur l'analyse de ces paramètres spatiaux à travers plusieurs niveaux d'abstraction (collaboration avec l'University College à Londres et le Département de Géomatique de l'Université de Gävle en Suède).

6.1 Etude de la propagation de la sémantique des réseaux

La représentation et la manipulation de réseaux au sein des modèles et des logiciels de SIG reste encore un domaine de recherche et applicatif largement ouvert. Nous proposons une étude des propriétés sémantiques des réseaux à travers l'application d'un opérateur de projection (tel qu'il est défini par les langages d'interrogation de bases de données relationnelles) (Claramunt et Mainguenaud 1999).

Afin de décrire la sémantique d'un réseau, la classification proposée distingue les réseaux logiques, spatiaux complets ou spatiaux incomplets. La sémantique de ces réseaux est analysée au niveau des composants de réseau, lien et nœud (les composants d'un réseau). La sémantique des attributs alphanumériques est décrite à travers des constantes qui décrivent la portée sémantique de chaque attribut (validité sur la totalité du réseau, sur les nœuds du réseau, sur les liens du réseau, sur les nœuds et liens du réseau). Ces constantes permettent, ou non, la propagation de ces attributs à un niveau d'abstraction supérieur (ex : des nœuds vers les liens ou vers le réseau), inférieur (ex : d'un réseau vers les liens, de liens vers les nœuds, d'un réseau vers les nœuds), ou à un même niveau d'abstraction. La propagation de ces propriétés sémantiques est caractérisée et illustrée à travers l'application d'opérateurs de graphe qui manipulent des composants de réseaux. Chaque opération possédant une sémantique propre, la propagation ou non des attributs qualifiés par une constante donnée est une fonction du résultat de cette opération (ex : nœuds, liens).

L'étude sémantique de la propagation des attributs réseau à travers des opérations de graphe, et par l'application de l'opérateur de projection, permet un meilleur « filtre » et contrôle des opérations de manipulation d'une base de données réseau. Dans la mesure où la qualification des différents attributs représentés est définie par le concepteur, les opérations de manipulation de ces réseaux sont contrôlées par le système donnant ainsi une meilleure garantie de la validité des résultats de ces opérations. Les extensions possibles de cette recherche concerne la définition d'un modèle sémantique qui étend l'approche réalisée pour les attributs alphanumériques aux attributs spatiaux.

6.2 Analyse de structures urbaines

L'analyse de structures urbaines, c'est à dire des motifs d'organisation et de distribution de cet espace est un domaine où le potentiel de représentation et d'analyse des SIG n'est pas complètement exploré. La recherche proposée intègre les fonctionnalités de la syntaxe spatiale au sein des SIG et identifie de nouvelles opérations morphologiques pour l'analyse de structures urbaines, et notamment de leur relation avec l'environnement bâti (Jiang *et al.* 1999, Jiang *et al.* 2001). L'approche est basée sur les méthodes expérimentales de la syntaxe spatiale définie comme un ensemble de théories et d'applications de calcul pour le développement d'analyses morphologiques (Hillier 1996). Le potentiel de la syntaxe spatiale est fondamental pour l'analyse et la planification de structures urbaines. La syntaxe spatiale est un domaine encore en plein essor dans les communautés de la planification urbaine et de l'urbanisme. Par exemple, les concepteurs d'un plan d'aménagement peuvent apprécier à travers l'application et le calcul de paramètres spatiaux (ex : connectivités locales et globales, intelligibilité), l'impact de la configuration spatiale proposée sur son fonctionnement (trafics pédestres et routiers par exemple). Les mêmes principes sont utilisables pour l'analyse de structures urbaines existantes.

Les modèles, et le prototype présenté Axwoman, introduisent une intégration au sein des SIG des paramètres de syntaxe spatiale, et la définition de nouveaux indices qui complètent les opérateurs actuellement identifiés. Dans un premier temps, l'intégration des paramètres de syntaxe spatiale dans les SIG étendent le potentiel de la syntaxe spatiale dans la mesure où ils peuvent être combinés avec des opérations d'analyses réalisables au sein de ces SIG, et avec également la possibilité d'intégrer d'autres sources de données thématiques. Un tel développement améliore le potentiel de la syntaxe spatiale en le rendant accessible à une plus large communauté d'utilisateurs. Le prototype présenté comporte une interface graphique qui facilite son utilisation et le calcul des différents indices de la syntaxe spatiale. L'interface graphique favorise la compréhension de la configuration urbaine, par la combinaison de visualisations géographiques et des indices de syntaxe spatiale calculés. Sur le plan de la modélisation, notre modèle étend les possibilités de la syntaxe spatiale généralement appliquée sur les structures de réseau

urbain, au bâti part de cet environnement. Un concept d'attraction spatiale est introduit et mesuré, il quantifie l'accessibilité d'un environnement bâti à partir d'un élément du réseau, un nœud du réseau dans le contexte de notre modèle (les mêmes principes sont applicables aux autres composants de réseau, notamment les liens). Ce concept est identifié et modélisé à différents niveaux d'abstraction. Il permet la qualification du rôle des différents composants d'un réseau en terme des accessibilités permises sur le plan du nombre de connections possibles avec le bâti environnant. Un tel modèle est utilisable pour l'analyse des relations entre des entités commerciales bâties et la configuration du réseau environnant. Le concept d'attraction spatiale est qualifié à partir d'indices locaux et globaux d'attraction d'un réseau (à travers son environnement bâti). La validation de cette recherche est un préalable à l'exploration de nouvelles extensions du modèle, les prochaines initiatives de ces travaux passent donc par la mise en œuvre du prototype proposé dans un contexte d'étude urbaine.

6.3 Bilan

La dimension réseau est bien souvent encore mal représentée et exploitée au sein des modèles spatiaux des SIG. Les application actuelles sont essentiellement orientées vers la gestion simple de réseaux de distribution, sans prise en compte à bas niveau d'opérateurs ou d'outils de traitement élaborés. Les fonctions SIG de traitement et d'optimisation de réseaux matériels ou « immatériels » restent très élémentaires. Ces aspects fonctionnels doivent encore se renforcer pour permettre de véritables mises en œuvres d'applications avancées pour les gestionnaires de réseau de distribution, de communication et les études scientifiques, qui modélisent certains phénomènes à partir de réseaux distribués dans l'espace. A défaut l'utilisation des SIG dans ces contextes opérationnels ou d'études de structures réseaux restera encore difficile de mise en œuvre (pas impossible, mais bien souvent contrainte par de véritables développements d'applications dans la mesure où ces fonctions ne sont pas livrées en « standard »).

Nos efforts dans ce contexte, tendent au niveau théorique d'une part, à mieux étudier et représenter les propriétés sémantiques des réseaux, et la propagation de ces propriétés à travers l'application d'opérateurs réseau. D'autre part, nous nous sommes attachés à modéliser un espace urbain à travers un modèle réseau qui permette l'analyse de la configuration spatiale et le fonctionnement de cette structure urbaine grâce à la définition d'un certain nombre de paramètres spatiaux élémentaires. Ces contributions illustrent le potentiel des SIG réseaux, nous pensons que ces outils devraient se développer dans les prochaines années notamment avec des collaborations logicielles avec les domaines du transport, des télécommunications ou plus généralement des réseaux de distribution.

Nos recherches devraient se poursuivre par un approfondissement des nos travaux sur l'identification et le traitement des propriétés des réseaux au sein des SIG (identification de nouveaux opérateurs à différents niveaux d'abstraction, outils de visualisation), et l'extension de nos explorations en terme de description et d'analyse de structures urbaines avec la syntaxe spatiale au sein des SIG (par le développement de prototypes notamment).

7 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'ensemble des recherches présentées dans ce rapport tentent d'améliorer l'efficacité des SIG pour la représentation de phénomènes du monde réel. Les premiers objectifs des SIG étaient orientés vers la numérisation et la reproduction de documents cartographiques statiques ; les besoins de modélisation, de représentation et de traitement dynamique des informations géographiques et temporelles au sein de ces SIG ne sont apparus que bien plus tard, au début des années 90 essentiellement ; ces besoins étant favorisés par les progrès impressionnants des puissances de calcul informatiques. La finalité de notre démarche est de rendre plus efficace les SIG dans des contextes scientifiques qui s'attachent non seulement à la description de données géographiques, mais également à la compréhension des phénomènes qui interagissent avec ces données.

L'intégration de la temporalité dans les SIG est devenue un besoin fondamental pour une meilleure représentation de la dynamique des systèmes géographiques. De nombreuses initiatives de recherche s'attachent à favoriser l'émergence de véritables SIG temporels. Les efforts principaux viennent du domaine des bases de données spatio-temporelles, de la géographie et de la géomatique. Les résultats actuels ne sont cependant que de trop partiels pour permettre l'émergence de véritables SIG temporels, par manque bien souvent de coordination de ces différentes disciplines. Les SIG temporels restent encore un objectif de recherche ouvert dans la mesure où les SIG actuels ne répondent pas aux fonctions attendues en terme de prise en compte et de traitement véritable de cette dimension temporelle.

Nos travaux tendent à identifier des modèles spatio-temporels qui puissent constituer des composants efficaces de représentation et de traitement de la dimension temporelle au sein des SIG, et des outils de raisonnement et d'analyse associés. Nos résultats actuels proposent des formes de raisonnement intégrées dans les dimensions temporelles et spatiales, et la prise en compte de plusieurs niveaux d'abstraction dans les modes opératoires de représentation et de traitement de l'information géographique et temporelle. Nous proposons également une modélisation des processus géographiques et de leurs propriétés, afin de mieux intégrer et comprendre la sémantique des applications du monde « géographique ». Nous identifions plusieurs typologies qui permettent de

décrire des processus élémentaires ou composés, et les contraintes associées à ces processus. Ces propositions se doublent d'expérimentations réalisées dans des domaines applicatifs multiples. Ces validations s'accompagnent également de prototypes qui jouent le rôle de validation et permettent d'enrichir nos propositions théoriques.

Le domaine de recherche des SIG temporels étant largement ouvert, nous envisageons de continuer nos recherches autour de ces sujets, tout en poursuivant notre démarche à deux niveaux : identification de nouveaux concepts et modèles spatio-temporels pour SIG (et le renforcement des modèles et outils que nous avons actuellement proposés), et validation dans des contextes applicatifs pertinents en liaison avec différentes disciplines scientifiques. Chaque thématique possède en effet ses particularités et ses difficultés qui constituent des sources fondamentales de validation des modèles proposés. Sur le plan théorique, l'extension des modèles spatio-temporels définis au niveau des SIG vers des formes de représentation et de traitement de l'information géographique et temporelle plus élaborées constituent une avenue de recherche ouverte que nous pensons continuer à développer. Le développement de formes de raisonnement spatio-temporels à différents niveaux d'abstraction et de granularité constituent des thèmes importants que nous pensons explorer dans la continuité de nos précédents travaux, et notamment la modélisation et la propagation de contraintes et de propriétés spatio-temporelles entre différents niveaux de représentation.

A un autre niveau, la prise en compte de modèles plus cognitifs et naturels de traitement de ces données spatio-temporelles est une nouvelle voie de recherche à explorer (dans le cadre du développement de nos recherches). Cette dernière est importante pour rapprocher ou réconcilier les fonctionnalités de traitement des SIG des modes de raisonnement plus naturel. Les formes de raisonnement actuelles ne sont en effet pas toujours adaptés aux formes de raisonnement utilisés par les utilisateurs de SIG ou les analystes de phénomènes spatiaux. Sur le plan de la représentation de phénomènes dynamiques, l'exploitation ou l'extension des modèles spatio-temporels vers la prise en compte de règles de propagation spatiale et temporelle de ces phénomènes est un thème de recherche à explorer, tant sur le plan des modèles et outils logiques nécessaires, que de leur expérimentation dans des contextes applicatifs complexes. La modélisation de processus à différents niveaux d'abstraction tout comme l'identification de relations entre

ces différents niveaux de perception et une avenue de recherche à explorer. Une telle démarche est importante pour les scientifiques, elle permet en effet de mieux comprendre la propagation des phénomènes environnementaux et urbains. Il est également envisagé de décrire et modéliser des processus plus complexes, tant dans des contextes urbains ou environnementaux

Sur le plan des validations et de la poursuite de projets de recherche, les collaborations en cours avec l'Université Laval devraient se renforcer dans le cadre de mes nouvelles fonctions à l'Ecole Navale. Ce rôle me permet de coordonner une équipe de recherche en SIG (3 maîtres de conférences, 3 thèses en cours) et d'initialiser un certain nombre de coopérations et de projets notamment, avec les organismes de la défense actifs dans le domaine de la cartographie ou de l'utilisation de données cartographiques aussi bien maritimes que terrestres (exemple : participation depuis quelques mois à un projet Thomson de suivi de l'évolution de bases de données géographiques militaires). Une thèse devrait notamment être initialisée fin 2001 sur le thème de la navigation assistée par informatique et la gestion assistée de risques de navigation (thèse encadrée). La plupart des directions de recherche que je pense explorer se situent à l'intersection des problématiques de l'espace et du temps. La combinaison de ces deux dimensions reste à notre avis une avenue de recherche importante et fondamentale pour une meilleure utilisation des SIG au sein non seulement des disciplines scientifiques mais aussi des gestionnaires de notre espace. Cette thématique devrait rester importante dans les prochaines années au sein de différentes communautés, notamment la communauté des bases de données spatio-temporelles qui se regroupe actuellement autour d'un pôle d'activité commun (cela se traduit en particulier par la mutation des conférences « Spatial Databases » en conférences « Spatio-Temporal Databases »).

Concluons ce rapport en soulignant que ces thèmes constituent des domaines de recherche passionnants dans la mesure où l'espace et le temps sont également l'essence même de réflexions plus fondamentales : de l'apparition à l'évolution, de l'avenir au devenir. Souhaitons que les SIG en général contribuent à mieux comprendre les systèmes de vie et leur évolution !

8 REFERENCES

- Abel, D. J., Taylor, K. et Kuo, D., 1997, Integrating modelling systems for environmental management information systems. *SIGMOD Record*, **26**(1), pp. 5-10.
- Abdelmoty, A. I. et El-Geresy, B. A., 1995, *A general approach to the representation of spatial relationships*, University of Glamorgan, TR CS-95-6, Pontypridd, Royaume-Uni.
- Allen, J. F., 1984, Towards a general theory of actions and time. *Artificial Intelligence*, 23: 123-154.
- Barbe, F., Gélébart, F., Devogele, T. et Claramunt C., 2001, A knowledge-based GIS for concurrent navigation monitoring, *GIS in the Environment*, P. Hall (ed.), Taylor and Francis, à paraître.
- Beller, A., 1991, Spatial/temporal events in a GIS. *Proceedings of GIS/LIS'91*, Bethesda, Maryland, ASPRS/ACSM, vol. 2, p. 766-775.
- Böehlen, M., Jensen, C. et Scholl, M. (eds.), 1999, *Proceedings of the International Workshop on Spatio-Temporal Database Management*, LNCS 1678, Springer-Verlag, Edimbourg.
- Burrough, P. H. A., 1986, *Principles of Geographic Information Systems for Land Resources Assessment*. Oxford, Clarendon.
- Burrough, P. H. A., R. van Rijn et M. Rikken, 1996, Spatial data quality and error analysis issues : GIS functions and environmental modeling. *GIS and Environmental Modeling : Progress and Research Issues*. Goodchild M. F., Steyaert L. T. et Parks B. O. eds., GIS World Books, Fort Collins, p. 29-34.
- Cheylan, J. P. et S. Lardon, 1993, Toward a conceptual model for the analysis of spatio-temporal processes. Frank A. et Campari I. eds. *Spatial Information Theory*, Berlin, Springer-Verlag, p. 158-176.
- Claramunt, C., 2000, Extending Ladkin's algebra on non-convex intervals towards an algebra on union-of regions, 9th International ACM GIS Conference, J. Li, K. Makki, N. Pissinou and S. Ravada (eds.), ACM Press, Washington D. C., 10-11 novembre, pp. 9-14, (annexe 1).
- Claramunt, C., 1998, *Un Modèle de Vue Spatiale pour une Représentation Flexible de Données Géographiques*, Thèse de Doctorat en Informatique, Université de Dijon.
- Claramunt, C. et Li, B., 1999, A multi-scale approach to the propagation of temporal constraints in GIS, Journal of Geographic Information and Decision Analysis, 3 (1), pp. 9-20, (annexe 2).
- Claramunt, C. et Jiang, B., 2000, Hierarchical reasoning in space and time, 9th International Symposium on Spatial Data Handling (SDH), 10-12 August 2000, Beijing, P.R.China, P. Forer, A. G. O. Yeh et J. He (eds.), pp. 3a. 41-51, (annexe 3).
- Claramunt, C. et Jiang, B., 2000, A representation of relationships in temporal spaces, *Innovations in GIS VII: Geocomputation*, P. Atkinson et D. Martin (eds.), Taylor and Francis, Londres, pp. 41-53.

Claramunt, C., Jiang, B., et Bargiela, A., 2000, A New Framework for the Visualisation of Urban Traffic Data, *Transportation Research Part C*, Elsevier Science (Pub.), 8(1-6), pp. 167-184.

Claramunt, C. et Lardon, S., (eds.), 2000, numéro spécial SIG et Simulations, *Revue Internationale de Géomatique*, 10(1), Editions Hermès Science, Paris.

Claramunt, C. et Mainguenaud, M., 1999, A revisited projection operator for the manipulation of networks within GIS. *Informatica*, special issue on spatial databases, F. E. Petry, M. A. Cobb et K. B. Shaw (eds.), 23(2), pp. 187-202. (annexe 4).

Claramunt, C. et Mainguenaud, M., 1996, A spatial representation and navigation model, *Advances in GIS II*, Kraak, M. J. et Molenaar, M. (eds.), Taylor and Francis, Delft, Pays-Bas, pp. 767-784.

Claramunt, C. et Mainguenaud, M., 1995, Spatial View: A dynamic and flexible vision of GIS database, Proceedings of the *DEXA International Conference and Workshop on Database and Expert System Applications*, Revell, N. et Min Tjoa, A. (eds.), Omnipress, Londres, pp. 483-493.

Claramunt, C. et Parent, C., 2001, Modelling concepts for the representation of évolution constraints, sélectionné pour un numéro spécial de *Computer Environment and Urban Systems*, Pergamon (Pub.), sous presse. (annexe 5).

Claramunt, C. et Thériault, M., 1996, Toward semantics for modelling spatio-temporal processes within GIS, *Advances in GIS II*, Kraak, M. J. et Molenaar, M. (eds.), Taylor and Francis, Delft, Pays-Bas, pp. 47-64.

Claramunt, C. et Thériault, M., 1995, Managing time in GIS: An event-oriented approach. *Recent Advances on Temporal Databases*, Clifford, J. et Tuzhilin, A. (eds.), Springer-Verlag, Zurich, Suisse, pp. 23-42. (annexe 6).

Claramunt, C., Huang, B. et Jiang, B., 2001, An Internet GIS for the interactive visualisation of real-time traffic data, *Advances in Telegeomonitoring*, R. Laurini (ed.), Springer-Verlag, à paraître.

Claramunt, C., Parent, C., Spaccapietra, S. et Thériault, M., 1999, Database modelling for environmental and land use changes, *Geographical Information and Planning: European Perspectives*, Stan Geertman, Stan Openshaw et John Stillwell (eds.), Springer-Verlag, pp. 173-194.

Claramunt, C., Parent, C. et Thériault, M., 1997, Design patterns for spatio-temporal processes. In *Searching for Semantics: Data Mining, Reverse Engineering*, S. Spaccapietra et F. Maryanski (eds.), Chapman & Hall, pp. 415-428. (annexe 7).

Clementini, E., Di Felice, P. et van Oosterom, P., 1993, A small set of formal topological relationships for end-user interactions, *Advances in Spatial Databases*, Springer-Verlag, LNCS 692, pp. 277-295.

Cohn, A. G., 1997, Qualitative spatial representations and reasoning techniques, *Advances in Artificial Intelligence*, Springer-Verlag, LNCS 1303, pp. 1-30

Cui, Z., Cohn, A. G. et Randell, D. A., 1993, Qualitative and topological relationships in spatial databases, *Advances in Spatial Databases*, Springer-Verlag, pp. 296-315.

Egenhofer, M., 1991, Reasoning about binary topological relations, *Advances in Spatial Databases*, Springer-Verlag, pp. 143-160.

Etches, A., Claramunt, C., Bargiela, A. et Kosonen, I., 1999, An interoperable TGIS model for traffic systems, *Innovations in GIS 6, Integrating Information Infrastructures with GI Technology*, Gittings, B. (ed.), Taylor & Francis, pp. 217-228.

Frank, A. U., 1994, Qualitative temporal reasoning in GIS - Ordered time scales. in Waugh T.C. and Healey R.C. eds. *Proceedings of the 6th International Symposium on Spatial Data Handling*, Londres, Taylor & Francis, p. 410-430.

Frank, A. U., 1992, Qualitative spatial reasoning about distances and directions in geographic space, *Journal of Visual Languages and Computing*, 3(4), 343-371.

Freksa, C., 1992, Using orientation information for qualitative spatial reasoning, *Theories and Methods of Spatio-temporal Reasoning in Geographic Space*, Springer-Verlag, LNCS 639, pp. 162-178.

Gehani, N. H., Jagadish, H. V. et Shmueli, O., 1992, Composite Event Specification in Active Databases: Model and Implementation. In *Proceedings of the 18th VLDB Conference*, Vancouver, Canada, pp. 327-338.

Goodchild, M. F., L. T. Steyaert, B. O. Parks *et al.* eds., 1996. *GIS and Environmental Modeling : Progress and Research Issues*. Fort Collins, GIS World Books.

Grzywacz, M. et Claramunt, C., 2000, An implementation of temporal operations within a cooperative traffic system, *International Journal of Applied Science*, special issue on applied cooperative systems, Cambridge International Science Publishing, sous presse, décembre 2000. (annexe 8).

Güting, R. H., 1994, An introduction to spatial database systems, VLDB Journal, Schek, H.-J. Ed., Vol. 3., pp. 357-399.

Hernández, D., 1994, *Qualitative Representation of Spatial Knowledge*, Springer-Verlag, LNCS 804.

Hillier, B., 1996, *Space is the Machine: A Configurational Theory of Architecture*, Cambridge University Press.

Hornsby, K. and M. Egenhofer, 1997, Qualitative representation of change. In *Proceedings of the Conference on Spatial Information Theory COSIT'97*, Frank, A.U. and Mark, D. (eds.), Springer-Verlag, LNCS 1329.

Jiang, B., Claramunt, C. et Klarqvist, B., 2001, An integration of space syntax into GIS for urban planning and design, *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, International Institute for Aerospace Survey and earth Sciences (ITC), Enschede, The Netherlands, sous presse.

Jiang, B., Claramunt, C. et M. Batty, 1999, Geometric accessibility and geographic information: extending desktop GIS to space syntax, *Computer Environment and Urban Systems*, Elsevier Science (Pub.), 23 (2), pp. 127-146, (annexe 9).

Knighon, R. et Claramunt, C., 2000, An aeronautical temporal GIS for post-flight evaluation of navigation performance, *Transaction in GIS*, 5(1), pp. 53-66, (annexe 10).

Kuipers, B., 1996, A hierarchy of qualitative representation for space, in *Working papers of the 10th International Workshop on Qualitative Reasoning about Physical Systems QR '96*, Menlo-Park, CA, AAAI Press.

Kuipers B. 1978. Modelling spatial knowledge. In *Cognitive Science*, 2:129-153.

Ladkin, P. B., 1987, *The Logic of Time Representation*, PhD dissertation, University of California at Berkeley, Novembre 1987.

Langran, G., 1992, *Time in Geographic Information Systems*. Londres, Taylor & Francis.

Laurini, R., 2000, An introduction to TeleGeoMonitoring: Problems and Potentialities, *Innovations in GIS 7: GIS and GeoComputation*, P. Atkinson et D. Martin (eds.), London, Taylor and Francis, pp. 11-26.

Laurini, R. et D. Thompson, 1992, *Fundamentals of spatial Information Systems*. Academic Press, Londres.

Maguire, D. J., M. F. Goodchild et D. Rhind W. eds., 1991, *Geographical Information Systems : Principles and Applications*, Longman Scientific and Technical, Londres.

Mainguenaud, M., 1997, Constraint-based queries in a geographical database for network facilities, *Computer Environment and Urban Systems*, 20(2), pp. 139-151.

Mainguenaud, M., 1995, The modelling of the geographic information system network component. *International Journal of Geographical Information Systems*, 593, Taylor and Francis, 9 (6), pp. 573-595.

Mendonça, L. et Claramunt, C., 2000, An integrated landscape and local analysis of land cover évolution in an alluvial zone, *Computer Environment and Urban Systems*, Pergamon (Pub.), à paraître, (annexe 11).

Motakis, I. et Zaniolo, C., 1995, Composite Temporal Events in Active Databases: A Formal Semantics. In *Recent Advances in Temporal Databases*, Clifford, J. et Tuzhilin, A. Eds., Berlin, Springer-Verlag, pp. 332-354.

Peuquet, D. J., 1994, It's about time; A conceptual framework for the representation of temporal dynamics in geographic information systems. *Annals of the Association of the American Geographers*, vol. 84, no. 3, p. 441-461.

Shoham, Y., 1988, *Reasoning about change*. MIT Press, Massachusetts.

Sperry, L., Claramunt, C. et Libourel, T., 2000, A spatio-temporal model for lineage metadata, *Geoinformatica*, special issue on spatio-temporal databases, Elsevier (Pub.), sous presse.

Thériault, M., Claramunt, C. et Villeneuve, P., 1999, Spatio-temporal framework for modelling disaggregate activity-travel behaviour, *Proceedings of the International Workshop on Spatio-Temporal Database Management*, M. Böhlen, C. Jensen et M. Scholl (eds.), LNCS 1678, Springer-Verlag, Edinburg, pp. 1-19, (annexe 12).

Thériault, M. et Claramunt, C., 1999, La modélisation du temps et des processus dans les SIG: Un moyen d'intégration pour la recherche interdisciplinaire, *Revue Internationale de Geomatique*, Hermes (Pub.), Paris, 9(1), pp. 67-103.

Tryfona, N. et Egenhofer, M., 1997, Consistency among parts and aggregates: a computational model, *Transactions in GIS*, 1(3), 189-206.

Valsecchi, P., Claramunt, C. et Peytchev, E., 1999, OSIRIS: An inter-operable system for the integration of real time traffic data within GIS, *Computer Environment and Urban Systems*, Pergamon (Pub.), 23(4), pp. 245-257 (annexe 13).

Vieu, L., 1997, Spatial representation and reasoning in artificial intelligence, *Spatial and Temporal Reasoning*, Kluwer, pp. 5-42.

Whigham, P. A., 1993, Hierarchies of space and time, in *Spatial Information Theory: A Theoretical Basis for GIS*, A. U. Frank et I. Campari (eds.), Springer-Verlag, pp. 190-201.

Worboys, M. F., 1994, A unified model of spatial and temporal information. *Computer Journal*, 37(1), pp. 26-34.

| | |
|----------------------------------|--|
| 9. LISTE DES ANNEXES..... | |
| ANNEXE 1 | |
| | CLARAMUNT, C., 2000, EXTENDING LADKIN'S ALGEBRA ON NON-CONVEX INTERVALS TOWARDS AN ALGEBRA ON UNION-OF REGIONS, <i>9TH INTERNATIONAL ACM GIS CONFERENCE</i> , J. LI, K. MAKKI, N. PISSINOU AND S. RAVADA (EDS.), ACM PRESS, WASHINGTON D. C., 10-11 NOVEMBRE, PP. 9-14. |
| ANNEXE 2 | |
| | CLARAMUNT, C. ET LI, B., 1999, A MULTI-SCALE APPROACH TO THE PROPAGATION OF TEMPORAL CONSTRAINTS IN GIS, <i>JOURNAL OF GEOGRAPHIC INFORMATION AND DECISION ANALYSIS</i> , 3 (1), PP. 9-20..... |
| ANNEXE 3 | |
| | CLARAMUNT, C. ET JIANG, B., 2000, HIERARCHICAL REASONING IN SPACE AND TIME, <i>9TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SPATIAL DATA HANDLING (SDH)</i> , 10-12 AUGUST 2000, BEIJING, P.R.CHINA, P. FORER, A. G. O. YEH ET J. HE (EDS.), PP. 3A. 41-51..... |
| ANNEXE 4 | |
| | CLARAMUNT, C. ET MAINGUENAUD, M., 1999, A REVISITED PROJECTION OPERATOR FOR THE MANIPULATION OF NETWORKS WITHIN GIS, <i>INFORMATICA</i> , SPECIAL ISSUE ON SPATIAL DATABASES, F. E. PETRY, M. A. COBB ET K. B. SHAW (EDS.), 23(2), PP. 187-202. |
| ANNEXE 5 | |
| | CLARAMUNT, C. ET PARENT, C., 2001, MODELLING CONCEPTS FOR THE REPRESENTATION OF ÉVOLUTION CONSTRAINTS, SÉLECTIONNÉ POUR UN NUMÉRO SPÉCIAL DE <i>COMPUTER ENVIRONMENT AND URBAN SYSTEMS</i> , PERGAMON (PUB.), SOUS PRESSE. |
| ANNEXE 6 | |
| | CLARAMUNT, C. ET THÉRIAULT, M., 1995, MANAGING TIME IN GIS: AN EVENT-ORIENTED APPROACH, <i>RECENT ADVANCES ON TEMPORAL DATABASES</i> , CLIFFORD, J. ET TUZHILIN, A. (EDS.), SPRINGER-VERLAG, ZURICH, SUISSE, PP. 23-42..... |
| ANNEXE 7 | |
| | CLARAMUNT, C., PARENT, C. ET THÉRIAULT, M., 1997, DESIGN PATTERNS FOR SPATIO-TEMPORAL PROCESSES. IN <i>SEARCHING FOR SEMANTICS: DATA MINING, REVERSE ENGINEERING</i> , S. SPACCAPIETRA ET F. MARYANSKI (EDS.), CHAPMAN & HALL, PP. 415-428..... |
| ANNEXE 8 | |
| | GRZYWACZ, M. ET CLARAMUNT, C., 2000, AN IMPLEMENTATION OF TEMPORAL OPERATIONS WITHIN A COOPERATIVE TRAFFIC SYSTEM, <i>INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED SCIENCE</i> , SPECIAL ISSUE ON APPLIED COOPERATIVE SYSTEMS, CAMBRIDGE INTERNATIONAL SCIENCE PUBLISHING, SOUS PRESSE..... |
| ANNEXE 9 | |
| | JIANG, B., CLARAMUNT, C. ET M. BATTY, 1999, GEOMETRIC ACCESSIBILITY AND GEOGRAPHIC INFORMATION: EXTENDING DESKTOP GIS TO SPACE SYNTAX, <i>COMPUTER ENVIRONMENT AND URBAN SYSTEMS</i> , ELSEVIER SCIENCE (PUB.), 23 (2), PP. 127-146..... |
| ANNEXE 10 | |
| | KNIGHTON, R. ET CLARAMUNT, C., 2000, AN AERONAUTICAL TEMPORAL GIS FOR POST-FLIGHT EVALUATION OF NAVIGATION PERFORMANCE, <i>TRANSACTION IN GIS</i> , 5(1), PP. 53-66..... |
| ANNEXE 11 | |
| | MENDONÇA, L. ET CLARAMUNT, C., 2000, AN INTEGRATED LANDSCAPE AND LOCAL ANALYSIS OF LAND COVER ÉVOLUTION IN AN ALLUVIAL ZONE, <i>COMPUTER ENVIRONMENT AND URBAN SYSTEMS</i> , PERGAMON (PUB.), À PARAÎTRE... |
| ANNEXE 12 | |
| | THÉRIAULT, M., CLARAMUNT, C. ET VILLENEUVE, P., 1999, SPATIO-TEMPORAL FRAMEWORK FOR MODELLING DISAGGREGATE ACTIVITY-TRAVEL BEHAVIOUR, <i>PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL WORKSHOP ON SPATIO-TEMPORAL DATABASE MANAGEMENT</i> , M. BÖEHLEN, C. JENSEN ET M. SCHOLL (EDS.), LNCS 1678, SPRINGER-VERLAG, EDINBURG, PP. 1-19..... |
| ANNEXE 13 | |
| | VALSECCHI, P., CLARAMUNT, C. ET PEYTCHEV, E., 1999, OSIRIS: AN INTER-OPERABLE SYSTEM FOR THE INTEGRATION OF REAL TIME TRAFFIC DATA WITHIN GIS, <i>COMPUTER ENVIRONMENT AND URBAN SYSTEMS</i> , PERGAMON (PUB.), 23(4), PP. 245-257..... |

