La recherche à l'IGN : activités 2000

Serge Motet, Frank Fuchs, Christian Thom, Anne Ruas, Michel Kasser, Jocelyn Marchadier, Laurent Guigues, Jean-Marc Viglino, Jean-Philippe Souchon, Jérôme Tarniewicz, et al.

▶ **To cite this version:**

Serge Motet, Frank Fuchs, Christian Thom, Anne Ruas, Michel Kasser, et al.. La recherche à l'IGN : activités 2000. Bulletin d'information de l'IGN N°72. 2001. hal-02372753

HAL Id: hal-02372753

https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-02372753

Submitted on 20 Nov 2019

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

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

La recherche
à l'Institut Géographique National

Activité 2000

La recherche en 2000

Résumé

Ce numéro dresse le bilan des recherches menées à l'Institut Géographique National au cours de l'année 2000. Il traite plus particulièrement de la détermination de la position d'instruments géodésiques, de l'utilisation de la caméra aéroportée numérique et de la géométrie des images en 2-D (cadastre) ou 3-D (linéaire de rue). Concernant les SIG, les sujets traités sont : la généralisation, les interfaces pour l'internet, la mise à jour et une application à l'analyse des risques.

Mot-clé principal : Information géographique.

Mots-clés : IGN, recherche, cartographie, géodésie, instrumentation, photogrammétrie, SIG, traitement d'image.

En couverture

Les courbes concernent le mouvement du mât portant l'antenne DORIS de l'ENSG pendant dix secondes (le 8 décembre 2000 à 10 heures). Il s'agit du mouvement dans le plan horizontal. La courbe claire représente la mesure du mouvement avant filtrage. La courbe foncée corrige le bruit de mesure. Elle a été déterminée selon le méthode décrite dans l'article B.9 de ce bulletin.

BD ALTI, BD CARTO, BD TOPO, BD ORTHO, GÉOROUTE et FEIV sont des marques déposées de l'Institut Géographique National

Table des matières

A. La recherche à l'IGN 1

A1 Les travaux du laboratoire MATIS **5**

A2 Les travaux du laboratoire OEMI **9**

A3 Les travaux du laboratoire COGIT **11**

A4 Les travaux du laboratoire LAREG **17**

B. Quelques actions marquantes 25

B1 Appariement de clichés terrestres guidé par un modèle : application à la construction de mosaïque de linéaire de rue (*J. Marchadier)* **25**

B2 Géoréférencement automatique de feuilles cadastrales *(L.Guigues & J.-M. Viglino)* **33**

B3 Réalisation et mise en œuvre d'une caméra numérique multi-canaux *(Ch. Thom & J.-Ph. Souchon)* ... **49**

B4 Amélioration de la précision de la composante altimétrique du GPS par une correction du délai troposphérique utilisant une mesure externe du contenu en vapeur d'eau *(J. Tarniewicz)* **59**

B5 Apport de l'information géographique dans l'analyse des risques. Application à l'étude des perturbations du réseau routier à la suite de catastrophes *(J.-F. Gleyze)* **69**

B6 Vers une approche de modélisation des bases de données géographiques pour une intégration cohérente des mises à jour *(H. Kadri-Dahmani)* **85**

B7 Conception d'une interface Web pour l'aide à la saisie des besoins en information géographique *(F. Hubert)* **93**

B8 Généralisation de données géographiques : présentation des résultats du projet AGENT *(C. Duchêne & A. Ruas)* **103**

B9 Un exemple de traitement de séries temporelles de positions d'instrument géodésique *(P. Sillard, S. Botton & D. Bouteloup)* **115**

C. Publications 131

Thèses de doctorat **131**

Articles de journal scientifique **131**

Communications en congrès **132**

Rapports de stages **135**

Rapports internes et comptes rendus **135**

A.1 La recherche à l'IGN

Serge Motet

L'Institut Géographique National (IGN) est bien connu comme l'organisme français chargé de la cartographie depuis plus de 50 ans. L'IGN a également mission d'effectuer des recherches d'intérêt général correspondant à ces activités de production. Ce bulletin d'information de l'IGN présente le bilan des recherches menées en 2000.

L'activité de recherche s'effectue en liaison avec les évolutions techniques qui ont profondément modifié l'activité de production, avec l'essor de l'informatique et des bases de données géographiques.

Les recherches s'inscrivent dans le cadre général d'un Schéma directeur. Le Schéma directeur actuel couvre la période 2000 - 2005. Il a été présenté au Comité scientifique et technique de l'IGN, le 14 septembre 1999. L'activité de 2000 a donc été fortement influencée par ce nouveau schéma directeur. Les objectifs de recherche issus de ce schéma sont détaillés ci-après.

Objectifs de recherche

Instrumentation

Altimétrie par GPS

L'objectif est d'utiliser le GPS pour des applications de nivellement comme l'hydrologie. On se focalise sur les erreurs de mesures GPS dues à la propagation dans l'atmosphère et sur un modèle de correction.

Localisation et orientation des images

Il s'agit de mesurer au cours du vol la position et l'orientation/attitude de chaque prise de vue. On vise à supprimer les mesures effectuées sur le terrain pour référencer les photos. La recherche s'intéresse actuellement à la détermination précise de la position de prise de vue par un traitement GPS, puis la détermination des directions en corrélant les images.

Exploitation des caméras numériques

L'IGN a développé des caméras utilisant des matrices CCD. Il s'agit d'expérimenter des utilisations qui tireront profit de ces spécificités : faible encombrement, forte dynamique ….

Photogrammétrie et traitement d'image

La recherche s'articule autour de l'exploitation des prises de vue aériennes et la production ou la maintenance de base de données de précision sub-métriques. Elle se décline en six axes.

Données de référence en imagerie 3-D

Il s'agit de proposer à la communauté scientifique des images, des données de référence et des outils d'évaluation pour comparer les résultats des différentes équipes.

Modélisation radiométrique

Cet axe s'intéresse aux images des caméras aériennes utilisant une matrice CCD. Contrairement aux images photographiques, celles-ci sont constituées de valeurs ayant un lien simple avec la radiométrie. L'objectif est d'associer un pixel et l'albédo de la zone couverte. Ces recherches s'appliqueront aux produits fusionnant plusieurs images comme les mosaïques et les ortho-images.

La lecture couplée cartes et images

Cette recherche vise à l'utilisation concourante des images aériennes, des cartes et des plans cadastraux pour produire en particulier de l'information parcellaire. Elle sollicite plusieurs techniques relevant du traitement d'images (classification, segmentation, etc...), de la vectorisation et de la comparaison de plusieurs sources.

Modèle numérique d'élévation et de terrain

En corrélant deux images d'un même site prises de lieux différents, on peut déduire une information tridimensionnelle, à l'instar de la vision humaine. Sur ce principe, il est envisageable de produire une surface 3-D (MNE) enveloppant les rues, les maisons, etc, à partir d'images. En 2000, on a étudié l'utilisation de plus de deux images pour un même site (multi-stéréo), le processus initial de corrélation, la construction de cette surface et le traitement des occlusions.

Détection de changements

Le problème est de maintenir l'actualité de bases de données déjà constituées, couvrant une grande étendue où les changements sont éparpillés. Les changements sont donc difficiles à détecter. On cherche les changements à partir d'une prise de vue aérienne récente. Une approche consiste à extraire un MNE, puis à construire un processus de décision fondé principalement sur les variations du sursol.

Cette approche conduit à étudier la délimitation de la notion de changement et un processus de focalisation pour la prise de décision.

Reconstruction du bâti

On vise à restituer des modèles de bâtiments en trois dimensions. Il s'agit d'automatiser en partie leur production pour qu'ils soient davantage utilisés en particulier en milieu urbain. Les approches s'appuient sur la croissance ou l'amélioration de modèles, sur le concours de données externes, sur l'apport de la multi-stéréo.

L'IGN travaille aussi sur l'appariement de modèles et de clichés terrestres, pour plaquer des photos de façades sur les modèles de bâtiments.

Information géographique

L'IGN mène des recherches dans les domaines de la cartographie, de la gestion et de la diffusion de l'information géographique. Plus précisément, il travaille sur les quatre sujets suivants :

Gestion des évolutions

Certaines bases de données géographiques ont été constituées et diffusées. Le problème de maintenance se pose actuellement aux producteurs et à leurs utilisateurs. Cet axe de recherche vise à définir les informations d'évolution, les procédures d'échange et les méthodes d'intégration dans les bases de données des utilisateurs. Il relève de la définition d'infrastructures d'information géographique.

Consultation sur Internet

Cet axe de recherche prépare l'accès par l'internet à une information géographique adaptée au besoin spécifique de l'utilisateur.

Les objectifs sont :

- à court terme, répondre à une demande explicite d'un type de données par un utilisateur. On met l'accent sur la convivialité ;
- à plus long terme, assurer une certaine autonomie des applications (l'utilisateur n'exprimant qu'un besoin) fondée sur la formalisation des méta-données ;
- définir des méthodes d'accès en fonction des catégories d'applications.

Base de données unifiée

Les bases de données peuvent avoir été produites indépendamment les unes des autres, elles décrivent cependant le même espace et les mêmes entités géographiques. L'objectif de cet axe est de concevoir une base de données, correspondant à la granularité la plus faible, à partir de laquelle tous les produits pourraient être dérivés.

Les mécanismes de multi-représentation sont étudiés, ainsi que l'intégration de données 3-D et la conception de produits dérivables à partir de cette base unifiée.

Études de risques

L'objectif est de mettre en lumière comment les informations géographiques (implicites et explicites) peuvent être utilisées dans un domaine d'application particulier, en l'occurrence la prévision et la gestion des risques.

Il s'agit essentiellement de déterminer et de modéliser les structures intervenant dans la notion de risques qui sont implicites dans les bases de données. On s'appuie sur les acquis du laboratoire concernant la généralisation et les méthodes d'analyse spatiale.

Géodésie

Géodésie spatiale

Il s'agit de renforcer l'implication du LAREG dans les études portant sur les systèmes DORIS, GLONASS, EGNOS et GPS et de participer aux études sur le futur système européen Galileo.

Géodynamique, déformations régionales

En s'appuyant sur le réseau de stations GPS permanentes et les progrès à venir de la mesure sur la composante verticale, il s'agit d'étudier les déformations tectoniques, c'est-à-dire de les mesurer mais aussi de modéliser, de façon quantitative, les phénomènes observés.

Systèmes de référence

Le laboratoire LAREG est l'un des créateurs du repère de référence international ITRF. Il s'agit maintenant d'améliorer le processus de combinaisons pour la réalisation du système international de référence terrestre (ITRS) et de développer et contrôler des rattachements locaux dans les sites de co-localisation (sites où plusieurs techniques de géodésie sont utilisées).

Géoïde et géodésie physique

L'objectif est d'avoir une meilleure connaissance du champ de gravité et un géoïde français plus précis.

Organisation de la recherche

L'IGN est un établissement public de l'État à caractère administratif, placé sous la tutelle du Ministre de l'Équipement, du Logement, des Transports et du Tourisme. Sa mission de recherche est définie par le décret du 12 mai 1981.

La recherche est menée par quatre laboratoires. En outre, l'IGN est doté d'une structure d'évaluation et d'orientation - le Comité Scientifique et Technique (CST) - dont le rôle est défini par l'arrêté du 14 mars 1986.

Chaque laboratoire travaille dans une discipline particulière :

1- Image et photogrammétrie	Méthodes d'Analyse et de Traitement d'Image pour la Stéréorestitution (MATIS),
2- Instrumentation	Laboratoire d'Opto-Electronique & de Micro-Informatique (LOEMI),
3- SIG et Cartographie	Conception Objet et Généralisation de l'Information Topographique (COGIT),
4- Géodésie	LAboratoire de REcherche en Géodésie (LAREG).

Au sein de l'IGN, la Direction Technique assure la maîtrise d'ouvrage de la recherche. Elle s'appuie sur le Schéma Directeur de la Recherche, détaillé dans le chapitre précédent.

Les laboratoires sont répartis dans deux services de l'établissement :

- l'École Nationale des Sciences Géographiques (ENSG) accueille le laboratoire LAREG et
- le Service de la Recherche, les trois autres laboratoires.

Un programme de recherche est présenté chaque année au CST par la DT en fonction du schéma directeur et des propositions des chercheurs. Ce programme se répartit selon les quatre disciplines. Il est ensuite divisé en actions de recherche (AR). Chaque AR a un responsable, un budget et un suivi comptable.

Effectifs

Les effectifs de recherche sont constants. Leur répartition pour l'année 2000 dans les différents laboratoires et les différentes catégories est résumée par le tableau A.1, page suivante.

***tableau A.1** : effectifs 2000*

		chercheurs	dont thésards	dont CdR	support	TOTAL
MATIS	1 janvier 31 déc.	**15** **15**	8 9	4 2	2 2	**17** **17**
LOEMI	1 janvier 31-déc.	**4** **4**	1 1	1 1	2 2	**6** **6**
COGIT	1 janvier 31 déc.	**20** **17**	11 10	6 5	1 1	**21** **18**
LAREG	1 janvier 31 déc.	**11** **10**	1 0	1 1	1 0	**12** **10**

Dans les colonnes 4 et 5 du tableau A.1, on trouve les étudiants inscrits en doctorat qui travaillent à l'IGN. Ces étudiants sont, soit des ingénieurs fonctionnaires, soit sous contrat de recherche (CdR). La vingtaine de stagiaires de troisième cycle qu'accueillent les laboratoires chaque année ne sont pas décomptés dans le tableau.

Résultats

Publications

On trouvera les références des articles, ainsi que celles des thèses de doctorat et des rapports dans la partie C, à la fin de ce bulletin.

Doctorats

Trois thèses ont été soutenues durant l'année 2000, comme l'indique le tableau A.2.

***tableau A.2** : doctorats soutenus en 2000*

	Date de soutenance	Titre de la thèse
Thierry Badard	15 décembre	Propagation des mises à jour dans les bases de données géographiques multi-représentations par analyse des changements géographiques.
Nicolas Boichis	3 mars	Extraction automatique des carrefours routiers dans les images aériennes guidée par une base de données cartographique.
Arnaud de la Losa	28 janvier	Modélisation de la troisième dimension dans les bases de données géographiques.

Contrats de recherche

Le projet européen AGENT s'est terminé le 5 décembre 2000. Ce projet ESPRIT traitait de la généralisation cartographique par des systèmes multi-agents.

L'IGN participe au projet européen MurMur (programme IST), lancé le 1er janvier 2000. Ce projet traite de la multi-représentation et de la multi-résolution dans les bases de données localisées.

L'IGN a également effectué plusieurs études pour le compte du Ministère de la Défense sur la généralisation cartographique, les questions de précision et de qualité, le multi-échelle et les modèles numériques d'élévation. Certaines études ont été menées en collaboration avec des industriels.

Projets internes

Pour exploiter les résultats du projet européen AGENT, un projet interne pour la généralisation de la série à l'échelle du 1 : 100 000 a été mis en place. Son objectif est l'automatisation du processus de réalisation des cartes de cette série à partir de la BDCarto, en insistant sur l'automatisation de la mise à jour des cartes.

Pour que le service des activités aériennes de l'IGN puisse utiliser la caméra numérique de façon autonome, un projet interne a été mis en place. Ce projet développe une chaîne d'archivage des données brutes, de pré-traitement des images et de validation de la mission.

Chercheurs invités

Grâce au soutien financier de la Direction de la Recherche et des Affaires Scientifiques et Techniques (DRAST) du Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement, l'IGN a accueilli Monica Sester, directrice de recherche à l'Institut de Photogrammétrie de l'Université de Stuttgart, du 28 février au 9 mars.

A.2 Les travaux du laboratoire MATIS

Frank Fuchs (Image & photogrammétrie)

Introduction

Cette partie décrit les travaux des chercheurs du laboratoire Méthodes d'Analyse et de Traitement d'Images pour la Stéréorestitution, effectués en 2000.

Cette année a été marquée par une soutenance de thèse : *Extraction automatique des carrefours routiers par interprétation d'images aériennes guidée par une base de données géographiques.* Cette thèse a été menée par Nicolas Boichis, en collaboration avec l'Université de Cergy-Pontoise.

Par ailleurs, les thèses actuellement en cours sont les suivantes :

- Thèse de Hassan Jibrini : Extraction de modèles de bâtiments 3-D à partir de données cadastrales vectorisées et d'images aériennes haute résolution. Directeur de thèse : Henri Maître, ENST.
  Les travaux se sont focalisés sur la détection des plans 3-D par transformée de Hough 3-D pondérée, guidée par les informations vectorielles cadastrales. Après détection des plans, un filtrage itératif produit un sous-ensemble de plans et un modèle numérique de surface. Enfin, deux types d'optimisation sur l'espace des facettes ainsi reconstruites sont proposés. Elles visent à obtenir une reconstruction finale consistante. Une technique d'optimisation heuristique est finalisée, alors qu'une technique d'optimisation globale est en cours d'étude.
  Publications : [JIBRINI et al 00a], [JIBRINI et al 00b], [JIBRINI et al 00c]. Soutenance prévue au second semestre.

- Thèse de Franck Jung : *Reconnaissance d'objets par focalisation et détection de changement.* Directeur de thèse : Donald Geman, ENS, Cachan.
  Les détecteurs ont été mis en place de façon à minimiser les sous-détections. Le modèle théorique initial a été quelque peu simplifié, et, en supposant l'absence de sous-détections, on a pu mener des développements théoriques poussés concernant les questions de convergence, et de sur-détection. Sous certaines contraintes, on a pu mettre en évidence certains agencements de questions (intervenant dans le processus de décision) optimaux : on souhaite minimiser le coût de la décision en cas de non présence d'objet (images de « fond »). Ce coût est lié au nombre de questions posées et à leur complexité propre.
  La rédaction du mémoire est très avancée. Soutenance prévue au premier semestre 2001.

- Thèse de Laurent Guigues : *Segmentation et comparaison de segmentations d'images aériennes. Application à la mise à jour de bases de données parcellaires.* Directeur de thèse : Jean-Pierre Cocquerez, UTC.
  Des outils de segmentation généraux ont été mis en place [GUIGUES 00]. Ils s'appuient sur une modélisation sous forme de graphes d'adjacence de régions des segmentations. Les méthodes utilisent une technique de « clustering » originale pour la recherche de groupes de régions pertinents pour l'objectif de segmentation. Ces groupes sont définis par une propriété qualitative : leur ressemblance interne est plus forte que leur ressemblance avec les groupes voisins. Une propriété essentielle qui en découle est que ces groupes sont hiérarchisés. Il en résulte des algorithmes efficaces pour leur construction (agrégation par files de priorité). En outre, la structuration hiérarchique permet ensuite de mettre en œuvre des techniques de décision robustes sur les groupes à retenir pour la segmentation finale.
  Par ailleurs, L. Guigues a proposé une amélioration des algorithmes de détection de la végétation arborée, précédemment proposés par O. Dissard et C. Baillard. Ces améliorations s'appuient précisément sur des segmentations qui permettent des délimitations plus précises des frontières et d'obtenir des classifications plus robustes.
  Enfin, L. Guigues a sensiblement contribué aux travaux de recalage du cadastre (voir « Lecture couplée carte/images », page 7).
  Publications : [GUIGUES, VIGLINO 00], [GUIGUES 00]. Présentation au groupe de travail GdR-ISIS (CNRS), octobre 2000. Soutenance prévue en décembre 2001.

- Thèse de Sébastien Drot : *Segmentation d'images par une approche de type Markov - objet.* Directeur de thèse: Xavier Descombes (INRIA), thèse CIFRE IGN/INRIA Sophia.
  Le modèle objet mis en place a été développé. Les objets utilisés ont désormais la possibilité d'avoir des orientations quelconques (contre deux orientations au départ). Des études sur des images de synthèse et des images réelles ont été menées.

- Thèse de Didier Boldo : *Réalisation d'un MNE et d'ortho-images à partir d'images aériennes pour la visualisation perspective de scènes urbaines*. Directeur de thèse : Georges Stamon (Université Paris-5).
  Les travaux ont porté sur la modélisation des effets atmosphériques et des paramètres du capteur (caméra numérique), ainsi que sur le calcul des limites d'ombres à l'aide d'un modèle 3-D de la scène urbaine. Enfin, un processus de fusion d'ortho-images a été mis en place.
  Publication : [LE MEN, BOLDO 00].

- Thèse de Jocelyn Marchadier : *Appariement automatique d'images haute résolution et d'un modèle tridimentionnel de site urbain, exactitude et réalisme.* Directeur de thèse : Didier Arquès, Ministère de l'Education, de la Recherche et de la Technologie.
  Parmi les problématiques étudiées, l'extraction de primitives a fait l'objet d'une publication [MARCHADIER 00].

Nous avons également travaillé sur des techniques d'appariement automatique de points et de droites :

- entre images, avec une approche tirant partie d'une connaissance *a priori* du modèle 3-D ;
- entre image et modèle.

Certaines des techniques développées sont décrites dans l'article B.1 de ce Bulletin d'Information : « Appariement de clichés terrestres guidé par un modèle : application à la construction de mosaïque de linéaire de rue », pages 25 à 32.
La fiabilité des appariements obtenus n'est pas suffisante pour pouvoir appliquer des méthodes de relèvement classique. Aussi, nous avons commencé à étudier de nouvelles méthodes de mise en place. Nous avons réalisé, entre autres, un logiciel de mise en place d'une ou plusieurs images avec un modèle 3-D, en utilisant différentes primitives (points et segments de droite) et différentes contraintes, comme le parallélisme de droites dans l'espace objet. Les contraintes utilisées permettent d'augmenter la redondance du système, ce qui peut mettre en évidence certaines fautes d'observation. Ce logiciel permet, entre autres, une saisie manuelle des différents appariements. L'utilisation d'estimateurs robustes a été envisagée et est en cours d'implémentation.

- Thèse de Frank Fuchs : *Reconstruction du bâti en milieu urbain à partir d'image aériennes à grande échelle. Étude d'une approche structurelle*. Directeurs de thèse : Hervé Le Men et Georges Stamon (Université Paris-5).
  Des travaux théoriques ont été menés afin de permettre des appariements modèle/données à l'aide de connaissances externes. Ces appariements avec connaissance externe sont exploités lorsqu'une grammaire de graphes est mise en jeu pour guider l'appariement d'un modèle. Par ailleurs, une méthode de reconstruction globale d'une scène a été mise en place. Elle permet de mettre en jeu plusieurs modèles et de sélectionner la meilleure combinaison de modèles pour la scène donnée. Le système a été évalué. Publication : [FUCHS 00]. Soutenance prévue fin avril 2001.

- Thèse d'Olivier de Joinville : *Evaluation de la qualité d'une cartographie urbaine à partir d'images à haute résolution.* Directeur de thèse : Henri Maître, ENST.
  Outre ses derniers travaux de recherche, O. de Joinville soutiendra sa thèse fin mars 2001.

La suite des travaux sera présentée par actions de recherche.

Lecture couplée carte / images

Remise en géométrie du cadastre

Jean-Marc Viglino a mené une étude de mise en géométrie des parcelles cadastrales vectorisées. Ces travaux ont été menés en collaboration avec le projet « BD Parcellaire ». Jean-Marc Viglino a étudié les déformations à mettre en œuvre sur les planches de données cadastrales papier, vectorisées à la main, afin de les recaler sur un cadastre remanié (géoréférencé), et d'évaluer les déformations issues de ce recalage et la précision finale obtenue. Plusieurs familles de fonctions ont été évaluées (Helmert, fonctions polynomiales : fonctions de déformations globales, splines, triangulations : fonctions de déformation par morceaux).

Une étude similaire utilisant une orthophotographie pour recaler les planches cadastrales a également été menée. Ceci permet de comparer les recalages sur le cadastre remanié et sur orthophoto, et notamment de voir à quel niveau se situe le recalage sur orthophoto par rapport au recalage sur le cadastre remanié, considéré comme la référence. L'évaluation de ces deux séries de recalages et la synthèse des travaux seront produites par Thierry Mercier (IGN - projet BD Parcellaire). Par ailleurs, des outils interactifs de choix de point de recalage ont été développés par Jean-Marc Viglino et mis en œuvre par un opérateur du projet BD Parcellaire.

Continuum cadastral

L'objectif est de géoréférencer les planches cadastrales. L'unité de travail est la commune.

La première étape est une mise en place des sections cadastrales au sein de la commune :

- on commence par extraire la section utile de la planche cadastrale, et éventuellement insérer les développements en marge à l'intérieur de la section ;

- des appariements locaux entre parcelles sont détectés par mise en correspondance des bords. Ces appariements locaux sont utilisés dans un critère de mise en place globale de toutes les planches de la commune. La BD CARTO sert de référence pour les bords des planches extérieures de la commune, ainsi que de géoréférencement ;

- les résultats obtenus donnent un positionnement final à 20 m près, suffisant pour un recalage fin.

La seconde étape est un recalage fin sur orthophotos, ou probablement à partir des croisillons Lambert, lorsqu'ils sont présents.

Des méthodes de recalage fin et robuste (en norme L1) d'éléments linéaires ont été développées et étudiées par L. Guigues et J.-M. Viglino. Ces méthodes opèrent sur des éléments linéaires des planches cadastrales vectorisées et sur des segments détectés dans les orthophotos. Une étude poussée des performances des méthodes (en termes de rejet de faute et de temps CPU) de recalage de segments en norme L1 a été faite. Des tests sont en cours avec le projet BD Parcellaire, afin d'en étudier l'intégration au sein du projet.

Détection de changements

Outre la thèse de F. Jung (voir plus haut), la thèse de Laurent Garcin a débuté. Il a principalement effectué une étude bibliographique de sa problématique, notamment sur la qualification d'objets 3-D.

Modélisation radiométrique d'images stéréoscopiques

Voir paragraphe sur la thèse de D. Boldo (page 5).

Corrélation multistéréoscopique et modélisation numérique de surface

Des tentatives de densification des résultats du corrélateur travaillant dans l'espace objet ont été faites, par augmentation de la taille de la fenêtre de corrélation. Il s'avère que les défauts habituels apparaissent dans ce cas aussi : la finesse de la surface est perdue car la mise en correspondance s'accroche aux lignes de contraste. En conséquence, il est envisagé de compléter le MNS obtenu par d'autres techniques.

Des travaux de caricature des modèles numériques de surface, avec ou sans données externes, ont été menés. Sans données externes, différents moteurs de décimation de triangulations ont été testés. Avec les données externes, l'étude a mis en évidence l'intérêt de faire coopérer MNE et base de données. En effet, la base permet de « nettoyer » les bords du MNE, connu pour un bruit planimétrique, alors qu'inversement, le MNE permet un redécoupage des zones de bâti de la base et donc proposer une version plus fine de la base, de la BDTOPO en particulier. En s'appuyant sur un découpage d'une zone de sursol en rectangles, il est possible de modéliser la surface de façon propre en plaquant quelques modèles simples sur ces rectangles [LOPES 00]. Enfin, des détecteurs de brins de contours 3-D qualifiés ont été mis en place pour les images de la caméra numérique [JAUFFRET 00], [JUHAN 00].

Reconstruction du bâti à partir d'images à grande échelle

Les travaux de reconstruction du bâti isolé par corrélation d'ortho-imagettes (Patrick Julien), à partir d'images à moyenne échelle ont continué. Des tentatives d'initialisation automatique ont été menées, soit par interprétation de carte, soit par extraction d'informations tirées du MNT produit par le corrélateur DAUPHIN.

Philippe Hottier a proposé un outil de simulation et d'étude de l'aérotriangulation, BottomAero, afin notamment d'évaluer précisément l'impact des données GPS absolu sur ces techniques. Il a, par ailleurs, effectivement mené l'étude en question, ainsi que l'étude d'un certain nombre de blocs déjà calculés par le passé. Publications : [HOTTIER 00a], [HOTTIER 00b], [HOTTIER 00c] et [HOTTIER 00d].

Franck Taillandier a débuté sa thèse sur la reconstruction du bâti à partir d'images numériques, en multiscopie. Après analyse du sujet de thèse, une première détection de contours 3-D a été proposée.

Évaluation et mise en place de données de référence

Des contacts ont été pris avec d'autres institutions européennes par Nicolas Paparoditis.

Valorisation

Didier Boldo, Olivier de Joinville, et Grégoire Maillet ont travaillé sur une action de valorisation des recherches : réponse à un appel d'offre concernant la production de Modèles Numériques de Surface à partir de différentes sources d'imagerie. Cette action a été menée avec le département TSI de l'ENST.

Publications

[BOICHIS et al 00] N. Boichis & J.-M. Viglino : *Knowledge based system for the automatic extraction of road intersection from aerial images,* International Archives of Photogrammetry an Remote Sensing XXXIII ISPRS, Amsterdam (Pays-Bas), laboratoire MATIS, IGN-SR 00-010/C-COM-NB, juillet 2000.

[FUCHS 00] F. Fuchs & H. Le Men : *Efficient Subgraph Isomorphism with « a priori » knowledge. Application to reconstruction of buildings for cartography*, IAPR Workshop on Syntactic and Structural Pattern Recognition, SSPR'2000, in Lecture Notes in Computer Science, n° 1876, laboratoire MATIS, IGN-SR 00-016/C-COM-FF, 2000.

[GUIGUES 00] L. Guigues : *Graphes, cocons et segmentation d'Images,* rapport interne, laboratoire MATIS, IGN-SR 00-017/C-RAP-LG, juin 2000.

[GUIGUES, VIGLINO 00] L. Guigues & J.-M. Viglino : *Automatic Road Extraction through Light Propagation Simultation,* in International Archives of Photogrammetry an Remote Sensing XXXIII ISPRS, Amsterdam (Pays-Bas), laboratoire MATIS, IGN-SR 00-011/C-COM-LG, juillet 2000.

[HOTTIER 00a] Ph. Hottier : *Aérotriangulation analytique, Simulations GPS absolu*, rapport interne, laboratoire MATIS, IGN-SR 012/C-RAP-PH, septembre 2000.

[HOTTIER 00b] Ph. Hottier : *Multicorrélation ponctuelle et précision sur le Mans,* laboratoire MATIS, IGN-SR 00-014/RAP-PH, 2000.

[HOTTIER 00c] Ph. Hottier : *Notions de photogrammétrie générale*, cours ENSG, laboratoire MATIS, IGN-SR 00-012/C-ENS-PH, 2000.

[HOTTIER 00d] Ph. Hottier : *Photogrammétrie analytique. Traitement des perspectives centrales*, rapport interne, laboratoire MATIS, IGN-SR 00-018/C-RAP-PH, 2000.

[JAUFFRET 00] T. Jauffret : *Amélioration de modèles numériques de surface de scènes urbaines par multi-corrélation de contour,* rapport de stage, laboratoire MATIS, IGN-SR 00-008/C-STA, 2000.

[JIBRINI et al 00] H. Jibrini, M. Pierrot Deseilligny, N. Paparoditis & H. Maître : *Reconstruction de modèles de bâtiments à partir de données 2-D cadastrales vectorisées et d'images aériennes,* RFIA'2000, Paris (F), laboratoire MATIS, IGN-SR 00-001/C-COM-HJ, 2000.

[JIBRINI et al 00b] H. Jibrini, N. Paparoditis, M. Pierrot Deseilligny, et H. Maître : *Automatic Building Reconstruction from Very High Resolution Aerial Stereopairs Using Cadastral Ground Plans.* International Archives of Photogrammetry an Remote Sensing XXXIII ISPRS, Amsterdam (Pays-Bas), laboratoire MATIS, IGN-SR 00-004/C-COM-HJ, juillet 2000.

[JIBRINI et al 00c] N. Paparoditis, Ch. Thom & H. Jibrini : *Surface reconstruction of urban areas from highly overlapping digital aerial images,* in International Archives of Photogrammetry an Remote Sensing XXXIII ISPRS, Amsterdam (Pays-Bas), laboratoire MATIS, IGN-SR 00-005/C-COM-HJ, juillet 2000.

[JUHAN 00] Juhan : *Appariement multi-stéréo de contours en utilisant l'espace objet*, rapport de stage, laboratoire MATIS, IGN-SR 00-019/C-STA-J, 2000

[LE MEN, BOLDO 00] H. Le Men et D. Boldo : *Mosaïque automatique d'orthophotographies,* in Actes RFIA'2000, vol. III, laboratoire MATIS Paris (F), IGN-SR 00-002/C-COM-HL, février 2000.

[LOPES 00] P. Lopes : *Modélisation approchée des scènes urbaines,* stage fin d'études d'ingénieur ESME Sudria, Université Paris-6, laboratoire MATIS, IGN-SR 00-007/C-STA-PGL, 15 septembre 2000.

[MARCHADIER 00] J. Marchadier, S. Michelin & Y. Egels : *A graph labelling approach for connected linear feature selection* IAPR Workshop on Syntactic and Structural Pattern Recognition, SSPR'2000, in Lecture Notes in Computer Science, n° 1876, IGN-SR 00-015/C-COM-JM, 2000.

A.3 Les travaux du laboratoire OEMI

Christian Thom (responsable du thème Instrumentation)

Contexte

On peut, comme les années précédentes, grouper les actions de recherche du LOEMI, pour l'année 2000, par domaine d'activité de l'IGN, ici la photogrammétrie et la métrologie/positionnement qui figurent tous les deux évidemment au Schéma directeur de la recherche.

Deux actions sont présentées plus dans le détail, à la fois aux Journées recherche de l'IGN (27-28 février 2000, Saint-Mandé) et dans ce Bulletin d'Information de l'IGN n° 72 (voir articles B.3 et B.4)

Photogrammétrie

Réalisation d'une caméra numérique

C'est la suite d'un axe de recherche poursuivi depuis 1991, consacré à la réalisation d'un prototype de caméra numérique destinée à remplacer les actuelles chambres de prise de vue à film argentique. C'est une part importante de la mutation générale à l'IGN vers la filière numérique. La possibilité pour l'IGN, dès maintenant, de disposer d'images numériques, lui permet d'adapter ses processus de productions à ce nouveau type de donnée.

Après la réalisation, les années passées, d'un prototype de caméra panchromatique et d'un autre basé sur un capteur couleur, le travail de l'année 2000 s'est porté sur la construction d'une caméra multi-canaux, c'est-à-dire de plusieurs caméras synchronisées permettant d'obtenir des images en vraie couleur. De plus, l'assemblage de deux canaux identiques (colorés type KODAK ou panchromatique) avec leurs axes de visés inclinés à gauche et à droite de l'axe de vol permet de doubler la fauchée de l'instrument, et ainsi de diminuer notablement les coûts de vol. Ces deux systèmes ont été testés durant cette année avec succès.

Les collaborations engagées, d'une part, avec le CNES dans le cadre de leurs simulations d'images haute résolution, et, d'autre part, avec l'industriel ZEISS/INTEGRAPH dans le cadre de la réalisation et des essais de leur propre capteur numérique se poursuivront.

La création d'un projet « Industrialisation de la caméra numérique » à l'IGN va décharger, dans un proche avenir, le laboratoire d'une grande partie de ses charges de production (voir article B.3).

Étude des systématismes des prises de vue aériennes

L'inconvénient de ces nouveaux capteurs tient dans le fait que leur résolution est plus faible que celle des dispositifs traditionnels. Il en résulte que pour couvrir un chantier donné à la même résolution-sol, un plus grand nombre d'images est nécessaire. Cela complique les processus de production, où l'on cherchera donc un plus grand niveau d'automatisation.

Pour pouvoir assembler des images, sous forme d'orthophotographies ou de modèle virtuel, par exemple pour restituer leur contenu par photogrammétrie, il faut tout d'abord localiser les points de prise de vue et orienter la caméra. Ceci était fait traditionnellement par le processus d'aérotriangulation qui nécessite de nombreux pointés dans les images, et la connaissance des coordonnées géographiques de certains points remarquables sur le terrain. Avec l'automatisation de nombreuses phases du travail cartographique, cette partie est en passe de devenir de plus en plus lourde et longue par rapport aux autres, surtout si, comme on l'a vu, le nombre d'images s'accroît et même si la partie localisation se fait maintenant de plus en plus par GPS. Il est donc urgent de trouver une méthode de mesure de l'orientation des capteurs lors de la prise de vue, suffisamment précise pour pouvoir éliminer le processus d'aérotriangulation.

Des solutions matérielles commerciales existent, basées sur l'utilisation conjointe du système GPS en mode cinématique et de centrales inertielles de haute qualité. Il reste donc à étudier si leur utilisation et leurs performances sont compatibles avec le travail cartographique de l'IGN, et l'impact sur les méthodes de production.

Un problème toutefois persiste, et c'est là l'origine du titre de cet axe de recherche : jusqu'à présent, l'utilisation de points de calage au sol assurait une cohérence des données au niveau du sol, ce qui était primordial. Avec ces nouveaux dispositifs, la cohérence sera assurée au niveau de l'avion, et donc la précision des mesures sur le terrain dépendra entièrement de la qualité de la modélisation des systématismes géométriques de la prise de vue, par exemple la distorsion de l'optique, ou l'effet du hublot qui sépare la caméra de l'extérieur de l'avion. Heureusement, l'utilisation groupée de l'ancienne méthode et des nouveaux capteurs devrait pouvoir permettre, et c'est l'objet de cette étude, de raffiner ces fameux modèles. Des études ont été menées tant au laboratoire OEMI qu'au laboratoire MATIS sur ces sujets, avec la réalisation d'un vol de test pour étudier le changement de matériel GPS embarqué par des modèles non obsolètes, la précision réelle du GPS en mode cinématique, en fonction de la distance à la station de référence.

De plus, une étude sur la réelle nécessité d'utiliser une centrale inertielle de grande précision à été réalisée par Philippe Hottier, dans le cas où l'on dispose de positionnement GPS précis des points de prise de vue et de moyens de

détection automatiques de points de liaison entre images. Elle a montré que les précisions de ces centrales étaient insuffisantes pour se passer de points terrain, et que, par contre, la localisation des sommets de prise de vue suffisait à stabiliser le modèle, dans la plupart des situations de production à l'IGN.

Métrologie-positionnement

Altimétrie GPS

Pour une présentation générale des problèmes de la composante verticale du GPS, se reporter aux paragraphes du laboratoire LAREG (voir article A.5). Ici, on ne s'intéressera qu'à la partie instrumentale de la question, c'est-à-dire à la détermination de l'instrumentation extérieure au récepteur GPS nécessaire à l'amélioration de la précision verticale des résultats. Les solutions envisagées incluent les radiomètres à vapeur d'eau, le lidar, etc ….

Diverses simulations ont été réalisées en 2000, montrant la réalité du problème, surtout si l'on veut réaliser des stations courtes ou des mesures en cinématique. Elle se poursuivra par une participation à l'expérimentation ESCOMPTE en 2001 et la réalisation d'un premier prototype de LIDAR. Cette action de recherche est le sujet de thèse de JérômeTarniewicz (voir article B.4).

Télémétrie LASER aéroportée à champ large (TAMS)

L'IGN, en coopération avec ELF-Acquitaine, a développé les années passées, un télémètre LASER aéroporté (TAMS : Télémètre laser Aéroporté pour la mesure des Mouvements du Sol) capable de mesurer des subsidences submillimétriques (zones d'extraction minérale, zones tectoniques, mouvements de terrain) sur des zones étendues (jusqu'à 10 km x 10 km), en un temps bref (moins d'une heure). La précision planimétrique typiquement quatre à cinq fois moins bonne qu'en altimétrie.

Une première campagne aérienne de test a été effectuée en 1998 avec le système à bord de l'ARAT. Cette expérimentation a permis de démontrer une précision de positionnement de 1,5 cm en altimétrie. Cette précision insuffisante est principalement limitée par le bilan de liaison de l'instrument actuel, mais les résultats sont compatibles avec les prédictions et valident quand même le principe de la méthode.

Une nouvelle campagne avec un instrument amélioré a été réalisée en 2000 en coopération avec la Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement (DRIRE) de Lorraine, dans le cadre de la surveillance d'affaissements miniers où l'IGN et le BRGM ont été consultés. Le Service de Géodésie et de Nivellement (SGN) de l'IGN a pris part à la mise en œuvre du procédé sur le terrain. Pour le financement de l'expérimentation (essentiellement les heures de vol de l'avion de recherche ARAT) une demande a été faite auprès du Programme National de Télédétection Spatiale (PNTS). En 2001, de nouvelles heures de vol ont été redemandées pour pouvoir effectuer la re-mesure du site un an après. Des améliorations vont aussi être apportées au matériel.

Publications

[BOCK et al 00] O. Bock, J. Tarniewicz, C. Thom, J. Pelon & M. Kasser : *Study of external path delay correction techniques for high accuracy height determination with GPS,* in Phys. Chem. Earth, MS n° G4.3-0013, August 2000, laboratoire OEMI, IGN-SR 00-006/L-ART-OB, 2000.

[BOCK et al 00] O. Bock, J. Tarniewicz, C. Thom, & J. Pelon : *Effect of small-scale atmos-pheric inhomogeneity on positioning accuracy with GPS,* in Geophys. in Res. Lett., July 2000, laboratoire OEMI, IGN-SR 00-005/L-ART-OB, 2000.

[BOCK 00] O. Bock *: Results of the first aircraft experiment with the wide-angle airborne laser ranging system,* in European Physical Journal, Applied Physics, vol. 10, n° 1, pp. 79-86, April 2000, laboratoire OEMI, IGN-SR 00-004/L-ART-OB, 2000.

[BOCK, DOERFLINGER 00] O. Bock & E. Doerflinger : *Atmospheric processing methods for high accuracy positioning with the Global Positioning System,* COST-716 Workshop, Soria Moria, Oslo (N), July 10-12, laboratoire OEMI, laboratoire OEMI, IGN-SR 00-003/L-COM-OB, 2000.

[DUQUESNOY 00] T. Duquesnoy : *Validation du système Racal,* laboratoire OEMI, IGN-SR 00-003/L-RAP-TD, 2000.

[LEPESANT 00] F. Lepesant : *Étude et réalisation d'un système de détection à photodiode à avalanche pour télémètre laser,* stage de fin d'études ingénieur ENSEA, laboratoire OEMI, IGN-SR 00-001/L-STA-FL, 28 juillet 2000.

[MAAS et al 00] HG. Maas, C. Thom, JP. Souchon & CK Toth : *Digital Camera Experts Present their Views, "Three-Line Linear" versus "Multi-Head Array",* in revue GIM International, pp. 68-71, laboratoire OEMI, IGN-SR 00-002/L-ART-HGM, mai 2000.

[PAPARODITIS et al 00] N. Paparodidis, C. Thom & H. Jibrini : *Surface reconstruction of urban areas from highly overmapping digital aerial images*, in International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing XXXIII ISPRS, Geoinformation for all, Amsterdam (NL), July 2000, laboratoire MATIS, IGN-SR 00-005/C-COM-NP, 2000.

A.4 Les travaux du laboratoire COGIT

Anne Ruas (responsable du thème SIG et cartographie)

Contexte

Le laboratoire COGIT (Conception Objet et Généralisation de l'Information Topographique) étudie certaines problématiques liées aux données géographiques vectorielles : la modélisation de l'information, la conception de méthodes visant à faciliter les mises à jour, la dérivation de l'information, son accessibilité et l'utilisation de ces données dans des applications thématiques particulières. Le laboratoire COGIT travaille actuellement sur quatre actions de recherche présentée ci-dessous.

La gestion des évolutions

L'action de recherche sur les évolutions est dirigée par Thierry Badard. Elle étudie les méthodes de mise à jour des données géographiques. Le processus passe par la détection des évolutions, leur classification, leur intégration dans une base et leur propagation dans une base de données dérivées. La gestion des évolutions demande, d'une part, un ensemble d'algorithmes et une méthodologie d'appariements - pour retrouver les évolutions et pour relier la base source de la base dérivée - et, d'autre part, une nouvelle organisation de l'information pour faciliter ces opérations.

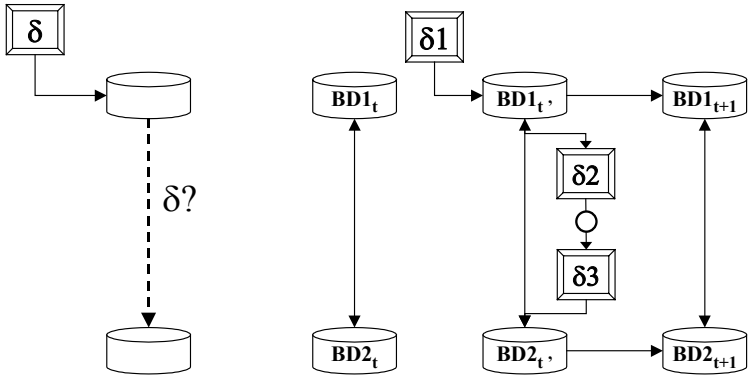


***figure A.4.1** : schématisation du processus de propagation des évolutions dans des bases de données*

En 2000, les résultats principaux de cette action de recherche sont la thèse de Thierry Badard (voir ci-dessous) et la première année de thèse d'Hakima Kadri-Dahmani (voir article B.6). Deux aspects viennent compléter les recherches antérieures : peut-on - par la modélisation des relations entre entités dans une base - assurer un maintien de la cohérence lors de l'introduction des mises à jour ? Peut-on analyser, décrire puis structurer les données d'évolution en tant qu'information à part entière ?

L'unification des bases de données

Cette action de recherche, dirigée par François Vauglin, a pour objectif d'unifier des bases de données géographiques afin de n'avoir plus qu'une seule base de données à gérer et d'en dériver, par généralisation, des bases types. Il s'agit donc de voir s'il est possible de regrouper les représentations différentes de l'espace géographique en une seule et même base à partir de laquelle il sera possible de dériver par généralisation les produits initiaux. L'intérêt est de n'avoir à gérer qu'une seule base et donc d'assurer *de facto* la cohérence entre représentations et de minimiser les opérations de mise à jour.

Cette recherche demande une comparaison des schémas de données et des données et afin de distinguer les informations dérivables de celles qui sont spécifiques et qui doivent être représentées. Cette action ne prévoit pas de dériver des schémas à la demande, mais d'éviter au maximum la duplication d'information pour des produits prédéfinis. Cette action de recherche utilise les outils d'appariements, mais ne les conçoit pas. De même, la généralisation est utilisée, mais non étendue, dans un premier temps. La première tâche consiste à concevoir le schéma de données qui puisse recevoir et dériver les représentations. Afin d'unifier les différentes bases, une comparaison des schémas de données et des données de la BDTopo, Géoroute et la BDCarto est nécessaire.

En 2000, les premières analyses ont été faites dans le cadre du projet MurMur (voir ci-dessous). L'IGN était responsable de l'écriture d'un état de l'art détaillé sur la représentation multiple dans les bases de données et de la formalisation du problème de l'unification des bases de données dans le cadre de l'outil de production de l'IGN.

Un effort d'analyse des schémas de données de la BDTOPO, de la BDCARTO, et de Géoroute a été conduit sur le thème du routier. Des premières propositions théoriques ne seront disponibles qu'en 2001.

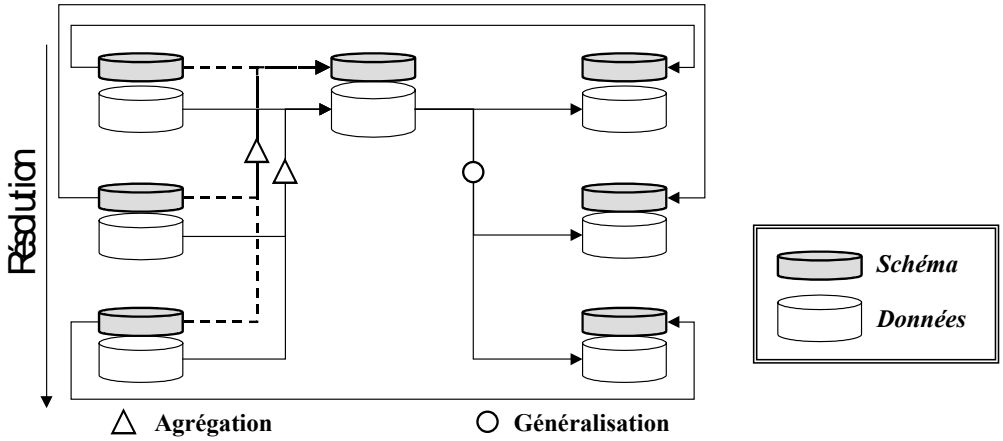


***figure A.4.2** : unification des bases de données et reproduction de données*

Les risques

Cette action de recherche, dirigée par Emmanuel Fritsch, étudie l'adaptation des données géographiques à l'analyse des risques. La première année a surtout consisté en une analyse de l'existant théorique et une meilleure connaissance des recherches applicatives essentiellement en France.

De nombreux contacts ont été pris, notamment avec le laboratoire ETNA du CEMAGREF qui ont abouti à l'arrivée de Yannick Manche au laboratoire COGIT, en janvier 2001, en post doctorat de dix-huit mois, pour nous apporter ses compétences thématiques sur l'analyse de la vulnérabilité face aux risques d'avalanche. À l'issue de cette première année, le laboratoire COGIT a décidé de s'orienter vers l'étude de la vulnérabilité, la prise en compte de l'incertitude de localisation et l'intégration conjointe des représentations vectorielles et maillées pour l'évaluation des risques.

En 2000, Jean-François Gleyze, dans le cadre de sa première année de thèse, a fait une analyse de l'existant et a orienté son travail de thèse sur les méthodes d'analyse du réseau routier pour le calcul de la vulnérabilité (voir son article B.5 de ce Bulletin). Par ailleurs, Olivier Bonin termine sa thèse sur la propagation des incertitudes lors de traitements géographiques, en étudiant plus particulièrement la propagation d'erreurs sur le calcul d'itinéraire (temps de parcours et itinéraires proposés).

L'accessibilité

Cette action de recherche, dirigée par Anne Ruas, étudie les solutions pour faciliter l'accessibilité aux données géographiques. L'objectif est qu'un utilisateur puisse, *via* Internet, recevoir de l'information géographique numérique adaptée à son besoin.

Au niveau recherche, le travail se décompose en trois parties :

- 1/ proposer des interfaces permettant à l'utilisateur d'exprimer ses besoins d'une façon intuitive ;
- 2/ savoir organiser les types de traitements SIG et les types de données, de telle sorte que le système puisse proposer à un utilisateur les moyens d'atteindre un objectif géographique ;
- 3/ savoir appliquer des opérations de généralisation en fonction de besoins spécifiques. La généralisation est prise comme application phare, parce qu'elle permet de dériver de l'information d'une base de données en fonction de besoins exprimés.

Actuellement, les modules en cours d'analyse et de conception ne sont, ni reliés, ni complets, ni complémentaires. En 2000, on notera les premières propositions de Frédéric Hubert sur la conception d'IHM à base d'échantillons (voir article B.7) et une implémentation par Bénédicte Bucher, d'un modèle de tâches et de rôles qui permet le choix des applications par l'expression des buts géographiques recherchés par un utilisateur.

Pour la généralisation, on notera la fin du projet AGENT (voir plus loin, ainsi que l'article B8 dans ce Bulletin d'Information.

Sébastien Mustière (Apprentissage supervisé), en dernière année de thèse, a conçu et testé un nouvel algorithme d'apprentissage et a publié quatre articles. Annabelle Boffet (Caractérisation de la ville), en deuxième année de thèse a conçu et implémenté une méthode de classification des îlots urbains et de délimitation des zones urbanisées.

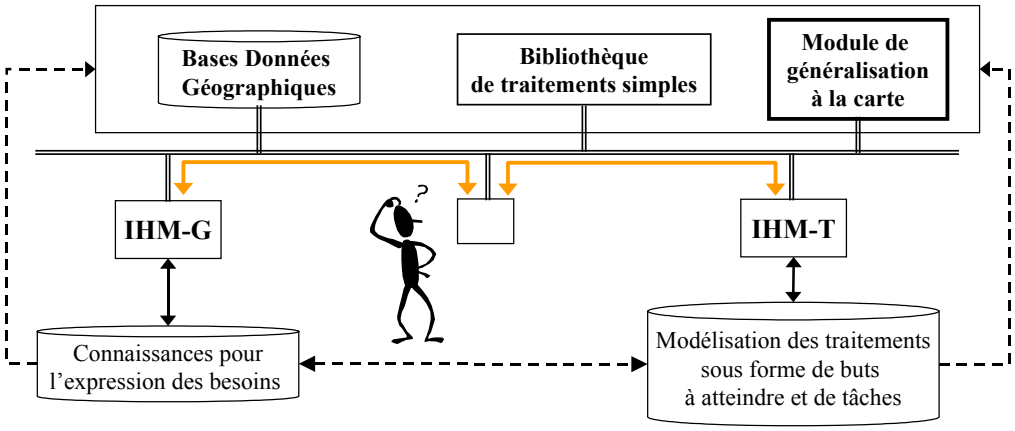


***figure A.4.3** : de l'utilisateur aux données adaptées*

Les projets Européens

Le projet AGENT *(http://agent.ign.fr)*

En 2000, le laboratoire COGIT a participé activement à la dernière étape du projet Agent, dont l'objectif était la conception d'un prototype de généralisation sur le SIG lamps2. Les résultats du projet sont présentés dans l'article B.8. Le projet s'est achevé à la fin novembre 2000.

Le projet MurMur *(http://lbdwww.epfl.ch/e/MurMur/)*

Le projet MurMur (*Multiple Resolution, Multiple Representation*) est un projet de deux ans et demi. Ce projet regroupe : STAR Informatic (producteur de SIG) - l'Université Libre de Bruxelles (Esteban Zimanyi) - l'Université de Lausanne (Christine Parent) - l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Equipe de Stefano Spaccapietra) - le CEMAGREF (Unité de recherche ETNA, Roland Burnet) et l'IGN (le laboratoire COGIT : François Vauglin).

Le projet, démarré début 2000, a pour objectif d'implémenter sur Star-Oracle un modèle de données adapté à la multi-représentation, proposé par Lausanne (modèle MADS) et de le tester sur des données de l'IGN (composante spatiale) et du CEMAGREF (composante temporelle). L'implémentation comprend un éditeur de schéma et un éditeur de requête. Pour l'IGN, il s'agit de proposer et de réaliser une base de données géographiques multi-échelle spatio-temporelle associant des données l'IGN (réseaux routiers et occupations des sols issus de BDTopo, BDCarto, GéoRoute) et des données du CEMAGREF relatives à des risques naturels (gestion spatiale et temporelle des avalanches). La première année a été consacrée essentiellement à la réalisation d'états de l'art et d'études préliminaires.

Les thèses passées en 2000

Deux thèses ont été soutenues en 2000 et ont obtenu les félicitations du jury.

Thèse d'Arnaud de La Losa

« Modélisation de la troisième dimension dans les bases de données géographiques ». Directeur de thèse : Bernard Cervelle, soutenue le 28 janvier 2000.

Dans sa thèse de doctorat, Arnaud de La Losa propose un modèle géométrique adapté au monde géographique, complété par un niveau topologique analogue au modèle 2-D, mais capable de gérer tout type de données 3-D. Si certaines fonctions ont pu être facilement étendues, des formes et des relations plus complexes font leur apparition. La thèse propose un modèle de représentation des informations (points, lignes, surfaces et volumes), liste les relations possibles et propose une implémentation objet des modèles géométriques et topologiques et des fonctions de bases : requêtes et construction de la cohérence topologique.

Thèse de Thierry Badard

« Propagation des mises à jour dans les bases de données géographiques multi-représentations par analyse des changements géographiques ». Directeur de thèse : Jean-Paul Cheylan, soutenue le 15 décembre 2000.

Pour permettre la diffusion des mises à jour dans les bases de données dérivées ou utilisateurs, Thierry Badard propose un modèle basé sur trois étapes successives :

- la première étape consiste à identifier les évolutions entre une base de données en partant de deux versions successives d'une base de données géographiques. En se basant sur des algorithmes d'appariement, les évolutions sont identifiées puis classées par type (création, destruction, modifications sémantiques, agrégation, etc.) ;
- la deuxième étape consiste à trouver les relations qui existent entre la base non mise à jour et sa base dérivée ou utilisateur. Ces relations sont également identifiées à l'aide d'outils d'appariement ;
- une fois que les bases sont connectées, les données d'évolutions sont propagées sur la base de données dérivées afin de la mettre à jour, grâce à l'utilisation d'une base de règles dédiée à la propagation.

Ce modèle a été testé sur des bases de données IGN à savoir : la mise à jour de la base Route500 à partir de la mise à jour de la BDCarto puis la mise à jour de la BDTopo25 à partir de la mise à jour de la BDTopo.

Les nouvelles inscriptions en thèse

Parmi les nouvelles inscriptions en thèse, trois ont pour laboratoire d'accueil le laboratoire COGIT et une, celle de Fabien Ramos, se passera dans les locaux de Matra.

- Sylvain Bard (IGN) : sur la conception de méthodes d'évaluation de données généralisées. Directeur de thèse : Bernadette Bouchon-Meunier (LIP6).
- Patricia Bordin (IGN) : sur la modélisation et la représentation cartographique des données d'évolution appliquées aux villes nouvelles. Directeur de thèse : Lena Sanders (laboratoire PARIS), inscription à l'Université de Marne-la-Vallée.
- Cécile Duchêne (IGN) : sur l'introduction des mécanismes de négociation pour la généralisation des zones hétérogènes. Directeur de thèse : Jean-Pierre Briot (LIP6), assisté de Christophe Cambier (LIP6 OASIS).
- Fabien Ramos (financement Matra) : sur l'analyse des composants d'un SIG 3-D, en étudiant les applications d'intervisibilité, de calcul de trajectoire et de visualisation 2-D et 3-D. Directeur de thèse : Bernard Cervelle (Université de Marne-la-Vallée).

Le laboratoire COGIT en chiffres

Le personnel

Le personnel du laboratoire COGIT est composé d'un tiers de thésard sous contrat et de deux tiers d'ingénieurs. La répartition par action de recherche est présentée dans le tableau A.4.1, ci-dessous. Nous y avons intégré les personnes IGN ou non IGN, présentes au laboratoire au 1er mars 2001, indépendamment de la nature des contrats et des financements. Les responsables d'action de recherche sont en gras.

tableau A.4.1 *: répartition par action de recherche*

	1ère inscription	2ème inscription	3ème inscription	4ème inscription	Docteur	Post-Doct	Ingénieur	%
Évolution	P. Bordin[1]	H. Kadri			**T. Badard**		A. Braun[1]	20
Unification	F. Ramos*		A. Bel Hadj Ali*		**F. Vauglin** JF Hangouët			20
Risques		JF Gleyze		O. Bonin	**E. Fritsch**	Y. Manche* [1]		20
Accessibilité	C. Duchêne S. Bard	F. Hubert	A. Boffet	B. Bucher S. Mustière			JG Affholder X. Barillot	40
Support							V. Beauce	-
Chef de Labo					**A. Ruas**			-

[1] : arrivé début 2001 *: financement non IGN

On notera que l'action de recherche sur l'accessibilité (Consultation et Généralisation) est plus importante parce qu'elle comporte deux thématiques distinctes.

Publications

Parmi les publications 2000, on notera que trois sont de rang A, six de rang B et les autres de rang C. Plusieurs articles [BADARD 00], [BEL HADJ ALI 00], [BONIN 00], [BUCHER 00], [DUCHENE 00] et [MUSTIÈRE 00], soumis en 2000 à des revues, sont en attente d'acceptation. De plus en plus de congrès en SIG font une sélection sur résumé (rang C) et les publications de certains papiers suivent sous forme de revue (Cartographica, IJGIS, Revue Internationale de Géomatique, etc.).

Les stages

Le laboratoire COGIT a encadré dix stagiaires, dont sept DESS (deux DESS Carto de l'ENSG), un DUT et deux ingénieurs (Centrale, Lyon et ENSAT).

La participation à l'enseignement (sur l'année scolaire 2000-2001)

- Les chercheurs du laboratoire COGIT donnent environ 500 heures de cours par an.
- Ces heures sont données par 65% du personnel du laboratoire COGIT.
- 40% des heures de cours sont données à l'ENSG, 10% à des écoles d'ingénieurs (ENPC, ENSIETA, ENTPE), et 50% à des universités (Paris-6, Paris-13, le pôle universitaire Léonard de Vinci et l'université d'Orléans).
- Les ingénieurs IGN assurent 88% des 188 heures données à l'ENSG. Sinon, ils donnent des cours aux écoles d'ingénieurs.
- Les thésards sous contrat donnent 91% de leurs cours en université, soit : 268 heures et le reste à l'ENSG (22 heures).
- 48% des cours concernent l'information géographique : Cartographie, SIG, Généralisation, Qualité des données, Analyse Spatiale, Géométrie Algorithmique.
- 52% concernent : l'informatique, les SGBD, les systèmes, les probabilités et statistiques.

Les publications en 2000

[BADARD, RICHARD 00] T. Badard & D. Richard : *Using XML for the exchange of updating information between geographical information systems,* à paraître dans le CEUS Journal Elsevier, 12 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-033/S-ART-TB, 2000.

[BADARD, SPERY 00] T. Badard & X. Spéry : *Problèmes liés à l'échange et à l'intégration des mises à jour dans les bases de données géographiques,* à paraître dans IGAT, Éditions Hermès, France, 21 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-035/S-ART-TB, 2000.

[BEL HADJ ALI, VAUGLIN 00] : A Bel Hadj Ali & F. Vauglin : *Assessing positionnal and shape accuracy of polygons in GISs,* Accuracy'2000, 12-14 juillet 2000, Amsterdam (NL), laboratoire COGIT, IGN-SR 00-036/S-COM-ABHA, 2000.

[BERTOLOTTO-LEIDINGER, HANGOUËT 00] : x. Bertolotto-Leidinger & J.-F. Hangouët : *Inscription d'une frontière,* Colloque Cartographie, Géographie et Sciences Sociales, Tours (F), septembre 2000, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-037/S-COM-BL, 2000.

[BOFFET 00] A. Boffet : *Creating urban information for cartographic generalisation,* International Symposium on Spatial Data Handling, SDH'2000, Pékin (Chine), 10-12 août 2000, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-046/S-COM-AB, 2000.

[BOFFET, COQUEREL 00] A. Boffet & C. Coquerel : *Urban Classification for Generalisation Orchestration,* in International Archive of Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS'2000, 16-23 juillet 2000, Amsterdam (NL), IGN-SR 00-045/S-COM-AB, 2000.

[BONIN 00] O. Bonin : *New Advances in Error Simulation in Vector Geographical Databases,* Accuracy'2000, 12-14 juillet 2000, Amsterdam (NL), laboratoire COGIT, IGN-SR 00-028/S-COM-OB, 2000.

[BUCHER 00] B Bucher : *Users' Access to geographic Information Resources : a Model of Tasks and Roles to specify intentional Uses regarding available Resources, abstract,* in Proceedings of the EuroConference on Ontology and Epistemology for Spatial Data Standards, La Londe-les Maures (France), published in Geographic Domain and Geographical Information Systems, GeoInfo, Stephan Winter (ed), laboratoire COGIT, IGN-SR 00-054/S-COM-BB, 2000.

[GLEYZE et al 00] J.-F. Gleyze, D. Allard & J.-N. Bacro : *Detecting regions of abrupt change : Wombling procedure and statistical significance,* in Proceedings de la Conférence GeoEnv'2000 (Third European Conference on Geostatistics for Environmental Applications, Avignon (F), novembre 2000, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-020/S-COM-JFG, 2000.

[HANGOUËT 00] J.-F. Hangouët : *Storing Voronoi Diagrams in Geographical Databases,* 5th GeoComputation, August 2000, Chatham (UK), laboratoire COGIT, IGN-SR 00-038/S-COM-JFH, 2000.

[LAGRANGE et al 00] F. Lagrange, S. Mustière & B. Landras : *Machine Learning Tachniques for Determining Parameters of Cartographic Generalisation Algorithms,* in International Archive of Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS'2000, 16-23 juillet 2000, Amsterdam (NL), vol. 33, part. B4, pp. 718-725, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-057/S-COM-FL, 2000.

[LECORDIX, MUSTIÈRE 00] F. Lecordix & S. Mustière : De nouveaux outils de généralisation numérique, in Bulletin du Comité Français de Cartographie (CFC), n° 163, pp. 40-44, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-047/S-ART-FL, 2000.

[MUSTIÈRE et al 00] S. Mustière, L. Saitta & J.-D. Zucker : *Learning Abstraction and Representation Knowledge: an Application to Cartographic Generalisation,* 5th International Workshop on Multi-Strategy Learning, MSL'2000, Guimaraes (Portugal), laboratoire COGIT, IGN-SR 00-0 , 2000.
[MUSTIÈRE et al 00] S. Mustière, L. Saitta : *An Abstraction-Based Machine Learning Approach to Cartographic Generalisation,* International Symposium on Spatial Data Handling, SDH'2000, Pékin (Chine), pp. 1a.50-63, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-049/S-COM-SM, 2000.
[RUAS 00] A. Ruas : *The role of meso objects for generalisation,* International Symposium on Spatial Data Handling, SDH'2000, Pékin (Chine), pp. 3b.50, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-053/S-COM-AR, 2000.
[SAITTA et al 00] L. Saitta, J.-D. Zucker & S. Mustière : *Abstraction et Changement de Langage pour Automatiser la Généralisation Cartographique,* 11ème Congrès Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle, RFIA'2000, Paris (France), vol 1, pp 411-418, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-051/S-COM-LS, 2000.
[DUCHENE, SCIARDIS 00] Cécile Duchêne & Yann Sciardis : *Conception of typical geographical objects to evaluate automatic generalisation process*., in GIS Sciences, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-021/S-ART-CD, 2000.

Rapports techniques et rapports publics de projets Européen

[GLEYZE 00] J.-F. Gleyze : *Introduction au risque,* rapport interne, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-030/S-RAP-JFG, février 2000.
[GLEYZE 00] J.-F. Gleyze : *L'Analyse de vulnérabilité dans les études de risques,* rapport interne, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-031/S-RAP-JFG, juillet 2000.
[JAKOBSSON, VAUGLIN 00] *X. Jakobsson & F. Vauglin : Report of a questionnaire on data quality in national mapping agencies, rapport technique du groupe de travail du CERCO sur la qualité,* laboratoire COGIT, IGN-SR 00-039/S-RAP-XJ, août 2000.
[MurMur1 00] : *Analysis of the cartographic and risk-management case-studies,* Bruxelles (Belgique), laboratoire COGIT, IGN-SR 00-040/S-RAP-MUR, juin 2000.
[MurMur2 00] : *Users feedback on MurMur's data modelling approach,* Bruxelles (Belgique), laboratoire COGIT, IGN-SR 00-041/S-RAP-MUR, juin 2000.
[MurMur4 00] : *State-of-the-art review in spatio-temporal and multi-representation modeling,* Bruxelles (Belgique), laboratoire COGIT, IGN-SR 00-042/S-RAP-MUR, septembre 2000.
[MurMur5 00] : *A conceptual data model for MurMur,* Bruxelles (Belgique), laboratoire COGIT, IGN-SR 00-043/S-RAP-MUR, septembre 2000.
[MurMur6 00] : *Data acquisition specification,* Bruxelles (Belgique), laboratoire COGIT, IGN-SR 00-044/S-RAP-MUR, septembre 2000.

Les rapports de stages

[BARD 00] S. Bard : *Révision d'une base de connaissance : application à la généralisation cartographique,* mémoire de DESS MQGAE : Méthode quantitative pour la gestion et l'aménagement de l'espace, Université de Metz, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-010/S-STA-SB, 2000.
[COCHARD 00] S. Cochard : *Évaluation de la qualité des données géographiques,* rapport de stage, DESS mathématique et traitement du signal, Université du Littoral Côte d'Opale, Centre Universitaire de la mi-Voix (Calais),, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-017/S-STA-SC, septembre 2000.
[DELATTRE 00] S. Delattre : *Modélisation des primitives surfaciques : approche par moments - Application à la qualification des liens d'appariements,* Université du Littoral Côte d'Opale, Centre Universitaire de la mi-Voix (Calais), stage : Ingénierie, DESS (Analyse d'images), laboratoire COGIT, IGN-SR 00-022/S-STA-SD, 2000.
[DIMITRIJEVIC 00] I. Dimitrijevic : *Étude des liens d'appariement topologique et géométrique dans les bases de données géographiques,* rapport de stage de DESS Intelligence Artificielle, Université Paris-6 (Jussieu), laboratoire COGIT, IGN-SR 00-009/S-STA-ID septembre 2000.
[DOLLÉ 00] L. Dollé : *Cartographie du risque - représentation de l'aléa et de la vulnérabilité - exemple des accidents de la route,* rapport de stage de DESS IMST, Université de Nice Sophia Antipolis, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-019/S-STA-LD, septembre 2000.
[MANG 00] S. Mang : *Analyse des sites web en Cartographie,* stage fin d'études d'ingénieur Génie Civil de l'École Centrale de Lyon, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-014/S-STA-SM, 13 juillet 2000.
[ROCCA SIERRA 00] S. Rocca Serra : *Identification of spatial structures for urban zones generalization,* stage de fin d'études d'Ingénieur Agronome & Msc Geo Information, ENSAT (Toulouse), laboratoire COGIT, IGN-SR 00-013/S-STA-SRS, 2000.
[ROSNET 00] S. Rosnet : *Développement d'un algorithme de généralisation,* rapport de Stage DUT Informatique, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-048/S-STA-SR, 2000.

A.5 Les travaux du laboratoire LAREG

Michel Kasser (responsable du thème géodésie)

Introduction. Présentation générale du laboratoire LAREG

Le Laboratoire de Recherches en Géodésie (LAREG) a mené, depuis plus de dix ans, des activités de recherche dans beaucoup de domaines de la géodésie spatiale, de la géodésie physique et dans l'étude des systèmes de référence, les études à caractère plus instrumental étant plutôt effectuées au sein du laboratoire OEMI, laboratoire d'instrumentation. Parmi les pôles d'excellence du laboratoire LAREG, ayant une grande visibilité internationale, il faut retenir l'activité en matière de calcul régulier des solutions de l'ITRF, participation majeure de la France à la géodésie qui a été confirmée récemment par l'Association Internationale de Géodésie lors de l'appel d'offres de 2000. L'ITRS (International Terrestrial Reference System) est la définition actuelle du référentiel mondial employé dans à peu près toutes les applications scientifiques et techniques requérant de la Géodésie.

Au cours des dernières années, la situation du laboratoire LAREG a pas mal changé, puisque ce laboratoire a été jusqu'en 1997 logé au sein du Service de la Géodésie et du Nivellement (SGN), et qu'il s'est installé à l'ENSG, lors de son transfert à Marne La Vallée. Cette nouvelle localisation géographique dans des locaux neufs a rendu plus difficiles les relations avec les activités de production, tout en permettant en parallèle de bénéficier d'une meilleure logistique (en particulier informatique grâce aux réseaux installés sur le campus, sans équivalent à Saint-Mandé). Un commandement unique SGN et laboratoire LAREG a été mis en place à la fin 1999, qui est destiné à harmoniser au mieux les liens recherche / production en matière de géodésie et de nivellement. Les activités de recherche peuvent être classées en quatre pôles.

Systèmes de référence

Le laboratoire LAREG a créé, diffusé, promu et fait évoluer le repère de référence international « ITRF » de façon à ce que le produit réponde aux exigences des utilisateurs en navigation, géodésie, géodynamique, géophysique, etc.

L'ITRF est un succès international marquant de l'IGN, avec deux volets de recherche concernant la réalisation :

- pour l'un : de l'ITRS sous forme de positions de stations et leurs vitesses linéaires ;
- et pour l'autre : de séries temporelles de positions de stations et des paramètres d'orientation de la terre.

Géodynamique

Une des orientations majeures de la géodésie opérationnelle actuelle est l'emploi de stations GPS permanentes (réseau GPS permanent « RGP » en cours de constitution en France). Ces stations vont devenir la réalisation concrète et très précise du référentiel national (ainsi que le volet régional du référentiel Européen EUREF), et à ce titre, il faut acquérir une expertise de haut niveau en matière de déformations tectoniques, tant mesures que modélisation des phénomènes observés. En outre, il faut travailler à l'amélioration des précisions ultimes atteignables, surtout sur la composante verticale (études sur les multi-trajets et sur les antennes en général, sur la troposphère et surtout sur la mesure de vapeur d'eau, avec le soutien de recherches instrumentales au laboratoire OEMI et des météorologues français).

Géodésie spatiale

Les études portent sur :

- DORIS (système d'orbitographie du CNES, en partenariat avec l'IGN, dont les performances géodésiques sont allées bien au delà des spécifications initiales, ce qui en a fait une des briques de base du système de référence mondial IERS, et sur lequel des améliorations majeures sont attendues dans l'année qui vient) ;
- GLONASS (équivalent russe du GPS, dont le nombre de satellites est encore insuffisant et dont l'avenir est encore incertain, mais qui peut compléter utilement GPS) ;
- EGNOS (complément européen des systèmes existants par des satellites géostationnaires, pour renforcer la fiabilité du positionnement disponible) ;
- GPS, les activités en la matière évoluant rapidement suivant les besoins du SGN en particulier (actuellement, les travaux portent sur la notion de stations virtuelles en matière de réseaux GPS continus), et, enfin ;
- les études préliminaires du futur système européen Galileo.

Par ailleurs, le laboratoire LAREG apporte un soutien régulier à la télémétrie laser sur satellites, effectuée à l'OCA, en participant aux observations et en étudiant des améliorations instrumentales pour la station laser ultra mobile FTLRS (développée avec une importante participation de l'IGN).

Géodésie physique

Concernant l'altimétrie et champ de pesanteur, les études portent sur :

- la connaissance du champ de gravité terrestre ;
- l'amélioration du géoïde national et de la grille de correction permettant le nivellement par des méthodes purement géométriques (GPS, par exemple) ;
- l'amélioration de l'analyse des observations de nivellement par l'étude du bilan d'erreur et la compréhension des déformations affectant les réseaux de nivellement.

Le laboratoire LAREG participe, par ailleurs, au fonctionnement quotidien du Bureau Gravimétrique International, à Toulouse. Il entretient des relations scientifiques nombreuses avec divers autres laboratoires français (GRGS, ENS, ESGT, IPGP,...) et étrangers (par exemple Université de Berne, JPL, MIT, BKG, GFZ,...), et bien entendu aussi, avec certains partenaires institutionnels majeurs (CNES, Observatoires de Paris, Midi-Pyrénées, Côte d'Azur, Strasbourg,...). Le laboratoire LAREG a regroupé en 2000, l'équivalent d'une dizaine de chercheurs (Z. Altamimi, M.-N. Bouin, M. Feissel, O. Jamet (depuis septembre), M. Kasser (à mi-temps), K. Le Bail (thèse, depuis novembre), L. Morel (fin de thèse), J.-M. Nocquet (thèse), P. Sillard, M. A. Sammuneh (thèse depuis septembre), P. Willis (à mi-temps), B. Langellier (Ingénieur, au BGI à Toulouse), M. Laplanche (technicien supérieur, au CERGA à Grasse) et C. Gardère (secrétaire). Ses moyens en personnels techniques peuvent, en tant que de besoin, être renforcés ponctuellement par le SGN. Les principales nouvelles orientations pour l'année 2001, en complément de la continuation des actions en cours, portent sur le démarrage des recherches d'O. Jamet en géodésie physique et sur un nouveau volet d'études sur DORIS à partir du logiciel de l'Université de Berne, initialement conçu pour le GPS.

Systèmes de référence

Le Repère International de Référence Terrestre (ITRF)

Zuheir Altamimi

Contexte

Cette action de recherche s'inscrit dans le cadre des activités du laboratoire LAREG au sein du Service International de la Rotation Terrestre (IERS). En effet, le laboratoire a, au niveau international, la responsabilité de l'établissement, la maintenance et la diffusion du Repère International de Référence Terrestre (ITRF). L'ITRF est la réalisation (ensemble de stations avec leurs positions) du Système International de Référence Terrestre (ITRS). L'idée de base de cette activité de recherche est la combinaison rigoureuse de données de positions et vitesses des stations issues de différentes techniques de géodésie spatiale (VLBI, SLR,GPS et DORIS), dans le but d'établir un repère de référence terrestre intégrant les qualités de toutes ces techniques.

Objectifs

Les principales actions menées en 2000 sont celles liées à l'élaboration et l'analyse de l'ITRF2000. Étant donnée l'adoption de l'ITRF, de plus en plus accrue dans les applications géodésiques et géophysiques, l'ITRF2000 sera une référence améliorée tant au niveau de la qualité, du réseau et de la définition du datum. Cette solution reflètera la réelle qualité du positionnement des techniques spatiales au travers de solutions de repères terrestres libres de toute contrainte externe. Elle inclura les stations primaires observées par VLBI, LLR, SLR, GPS et DORIS, ainsi que des réseaux GPS de densification, tels que : le réseaux Européen EUREF, Américain CORS, Amérique du sud SIRGAS, Antarctique, Alaska et le réseau GPS permanent (RGP). La figure A.5.1 montre la répartition des sites de l'ITRF2000. La qualité de l'ITRF2000 dépend en particulier des qualités des solutions individuelles incluses dans la combinaison. Le tableau A.5.1 résume les erreurs moyennes quadratiques pondérées par techniques, estimées dans la combinaison ITRF2000.

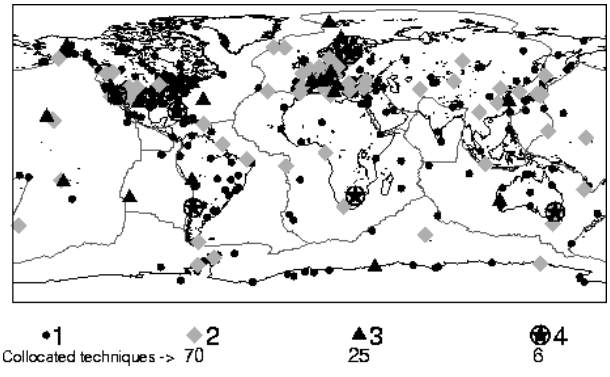


figure A.5.1 *: répartition des sites ITRF2000 et les techniques co-localisées*

tableau A.5.1

Technique	Nombre de solutions	EMQP en position mm	EMQP en vitesse mm / an
VLBI	3	2	1
LLR	1	50	4
SLR	7	3-10	2-4
GPS	6	2-5	2
DORIS	2	30	5
Multitechnique	2	5-10	2
GPS densification	9	1-8	1-3

Activités de Martine Feissel

M. Feissel, Astronome, participe aux travaux du laboratoire LAREG dans le cadre d'une convention de mise à disposition par son établissement d'origine, l'Observatoire de Paris. Elle dirige actuellement le GdR AGRET du CNRS (1999-2002). Ces activités de recherche et d'encadrement concernent les systèmes de référence terrestres et célestes.

Groupement de Recherches AGRET

L'activité principale du GdR en 2000 a été l'organisation d'un colloque qui s'est tenu à Grasse du 8 au 10 novembre 2000. L'action principale issue des discussions est la mise en chantier d'un « Manifeste pour l'observation géodynamique », incluant les observatoires géodynamiques permanents (exemple : le CERGA, Tahiti), la participation à des réseaux nationaux ou internationaux, les campagnes de mesures : utilisation scientifique des différents types d'observation, inventaire des contraintes et des problèmes, recommandations et suggestions. Ce document sera présenté aux différents organismes concernés (exemple : INSU, IRD, IGN) pour tenter d'obtenir un meilleur soutien de ces activités.

Stabilité du repère de référence céleste extragalactique

Le repère céleste extragalactique est la référence inertielle ultime de la géodésie spatiale. La réalisation actuellement en vigueur, l'ICRF *(International Celestial Reference Frame)* repose sur les observations VLBI de 1980 à 1999. Sa précision et sa stabilité sont estimées respectivement à 0,25 millisecondes de degré (mas) sur la position des radiosources de référence et 0,02 mas sur la direction des axes de coordonnées. Une étude détaillée des séries temporelles de coordonnées a été réalisée, qui montre qu'une sélection des observations fondée sur la stabilité à long terme des coordonnées observées permettrait d'améliorer de façon significative la qualité du repère de référence céleste.

Cohérence, précision et accessibilité du repère de référence terrestre

Le repère de référence international ITRF (International Terrestrial Reference Frame) est établi par le laboratoire LAREG en combinant des référentiels terrestres obtenus par les différentes techniques de géodésie spatiale. Un élément clé de la cohérence interne est la qualité des rattachements locaux entre stations des différentes techniques co-localisées dans un même site. Nous avons démarré un programme de validation *a posteriori* de ces rattachements à partir de résultats de contrôle du calcul de l'ITRF2000.

Deux thèses sous la direction de M. Feissel ont démarré en 2000 : la première (K. Le Bail), a pour objectif d'élaborer des outils statistiques de qualification de repères de référence terrestres obtenus à partir des mesures DORIS. La deuxième thèse (A. Sammuneh) a pour objectif l'élaboration d'une procédure optimale permettant un positionnement relatif de précision décimétrique par GPS dans des délais minimaux.

Participations internationales diverses

Membre du Comité de Revue de l'AIG. *Membre du Conseil de FAGS* (Federation of Geophysical and Astronomical data analysis Services). *Membre du Comité d'Organisation de la Commission XIV de l'AIG* (Crustal deformation). *Membre du Conseil du CDS* (Centre de Données astronomiques de Strasbourg).

Géodynamique

Étude de la déformation dans les Alpes

Jean-Mathieu Nocquet

Une étude du champ de vitesse ITRF97 a montré que l'Europe n'est pas stable au niveau de 1 mm/an. Seul un sous-ensemble de stations situées en Europe Centrale présente un niveau de rigidité compatible avec la précision de la mesure.

Dans le référentiel défini par ce sous-ensemble, les stations européennes situées à l'ouest du Rhin et des Alpes, ainsi que les sites espagnols présentent une vitesse résiduelle de 1-2 mm/an vers l'ouest. Ce résultat est compatible avec différentes observations géologiques : extension actuelle du fossé rhénan, extension Est-Ouest dans les Alpes occidentales, ouverture actuelle de la mer Tyrrhénienne. Nous l'utilisons donc comme hypothèse de travail pour replacer la déformation alpine dans un ensemble continental. Dans le but de confirmer et localiser la déformation associée à ce champ de déplacement, des mesures existantes à l'IGN ont été exploitées et de nouvelles campagnes réalisées.

En premier lieu, les mesures du Réseau de Référence (RRF) de 1993 et 1996 ont été retraitées dans un calcul homogène incluant des stations GPS permanentes européennes hors de France. Les données en Méditerranée (Corse, Sardaigne) des campagnes WHAT A CAT, disponibles à l'IGN ont aussi été traitées.

Deux campagnes de mesures ont été réalisées autour du fossé rhénan dans le cadre du programme GéoFrance 3-D volet Fossé Rhénan et du projet européen EUCOR-URGENT. Ce travail a lieu en collaboration avec l'Université de Karlsruhe, l'ETH Zürich et l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg (IPGS). Une campagne dans le Jura a été réalisée en collaboration avec l'IPSN (Institut de Protection et Sûreté Nucléaire), l'UMR Géosciences Azur et l'Université de Chambéry.

Enfin, une estimation des vitesses du réseau REGAL (Réseau GPS permanent dans les Alpes occidentales) a été réalisée incluant des données de stations depuis 1996. Cette solution a par ailleurs été soumise dans le cadre de la réalisation de l'ITRF2000. L'ensemble de ces données, traitées et combinées de manière homogène doit permettre la détermination rigoureuse d'un champ de vitesse en Europe de l'ouest, avec une densification particulière dans les zones reconnues comme actives (Fossé Rhénan, Jura, Alpes, Méditerranée). Une solution préliminaire incluant des sites européens ITRF97, REGAL et RRF a été réalisée. Elle suggère une extension du fossé rhénan à un taux de 1-2 mm/an et confirme l'extension E-W dans l'arc alpin au niveau de 2 mm/an.

Un produit important de ce travail est l'étude de la précision et de la stabilité au cours du temps des systèmes de référence géodésiques en France et en Europe. Les résultats obtenus sont les suivants :

- les déformations internes en France dégradent la précision des réseaux géodésiques nationaux à coordonnées fixes comme le Réseau Géodésiques Français (RGF). L'étude du RRF permet de fixer une borne supérieure de 3 mm/an à ces déformations ;
- le mouvement de 1-2 mm/an vers l'ouest de l'Europe occidentale diminue le niveau de compatibilité des réseaux français avec la partie de l'Europe située à l'est des structures Alpines et du fossé rhénan ;
- l'écart entre la vitesse moyenne de la plaque Eurasie mesurée par géodésie spatiale et la valeur choisie lors des réalisations du système de référence européen ETRS89 est de l'ordre de 1 à 3 mm/an.

Ces effets affectent les transformations de coordonnées issues des traitements des réseaux GPS permanents et les systèmes de référence légaux des pays européens. L'effet combiné des trois points évoqués précédemment ajouté aux erreurs propres de mesures et des référentiels indique qu'aujourd'hui le niveau de compatibilité entre les solutions du Réseau GPS Permanent (RGP) et le RGF sont de l'ordre de 3 cm. La connaissance fine des déformations doit permettre dans la suite de proposer un modèle cinématique améliorant la compatibilité de ces réseaux.

Composante verticale et GPS

Marie-Noëlle Bouin

Contexte et objectifs

La précision de la composante verticale du GPS est critique pour de nombreuses applications en géodésie comme en géodynamique. Cette action fait suite à des études méthodologiques entreprises au cours de la thèse de Marie-Noëlle Bouin sur le traitement de données GPS en Antarctique pour la détection de mouvements verticaux.

Activités

L'amélioration de la définition de la composante verticale en GPS inclut plusieurs volets méthodologiques. L'un porte sur le traitement GPS lui-même, le second sur la définition d'un système de référence stable et cohérent pour l'ensemble d'une solution GPS, à différentes échelles spatiales.

Dans le cadre de ces travaux, on a poursuivi et amélioré les résultats obtenus sur le réseau antarctique, permettant ainsi l'obtention de résultats sur la composante verticale exploitable pour la quantification du rebond glaciaire élastique et post-glaciaire. L'amélioration de la technique de calcul GPS et surtout de l'expression des résultats dans un système de référence unique a permis de confirmer des résultats importants pour la dynamique de l'Antarctique.

On a également entrepris, dans le même esprit, le traitement et l'exploitation des données du réseau RGP pour la détection de mouvements verticaux, en particulier liés à la surcharge océanique. La distribution du réseau permet la mesure de mouvements différentiels importants. Les résultats obtenus devraient pouvoir être comparés à des modèles de surcharge. Cette étude nécessite un effort de méthodologie particulièrement important, concernant encore une fois les deux étapes du traitement de données lui-même et de la mise en référence.

L'exploitation des données sur l'Antarctique pour la mesure du rebond glaciaire est appelée à se poursuivre, afin de rentabiliser au maximum l'existence de nouvelles stations et l'augmentation de la quantité de données exploitables. L'exploitation des stations du RGP pour les mouvements liés à la composante verticale en France (en Europe, si l'on inclut les stations EUREF) n'en est qu'à son début et doit évidemment s'intensifier. Il faut entre autres profiter de l'installation de nouvelles stations, offrant une meilleure couverture (Biarritz, Chizé, Lille).

Géodésie spatiale

DORIS

Pascal Willis

Contexte et objectifs

Le système DORIS est un système d'orbitographie développé par le CNES et l'IGN (1er lancement SPOT-2 en janvier 1990). L'IGN, dans le cadre d'une convention avec le CNES, est responsable de l'installation et de la maintenance du réseau des stations de poursuite (SIMB/H. Fagard) et des recherches concernant les utilisations pour la géodésie en coopération avec l'équipe du LEGOS (GRGS/CNES à Toulouse).

Les recherches à l'IGN se placent dans le cadre de l'Expérience Pilote DORIS initiée en 1999 et à laquelle participe l'IGN au sein du Bureau Central (avec le CNES/G. Tavernier et CLS/L. Soudarin) et comme l'un des Centres d'Analyse (logiciel Gipsy/Oasis développé au JPL/USA).

En 2000, un congrès (DORIS Day 2000) a été organisé par le CNES à Toulouse pour mettre en place l'Expérience Pilote DORIS au niveau international.

Du point de vue des recherches, l'effort informatique important entrepris en 1999 pour automatiser le plus possible les activités de calculs de localisation a été achevé. Lorsque les options de calculs sont définis, le calcul se déroule désormais de manière automatique (y compris pour la récupération des nouvelles données). Au printemps 2000, la totalité des mesures DORIS disponibles (depuis novembre 1992) a été entièrement retraitée en utilisant le nouveau modèle GRIM5 développé au GRGS/Toulouse (trois mois de calculs CPU !).

Les solutions journalières ont été cumulées pour obtenir des solutions hebdomadaires qui ont été transmises à l'IERS (cf article B.9). De plus, une solution globale positions/vitesses a été établie en étudiant les problèmes station par station. Cette solution IGN00D06 a été transmise à l'IERS et fera partie de la nouvelle solution ITRF2000.

Les résultats obtenus avec le nouveau champ GRIM5 montrent désormais des accords internes (d'un mois sur l'autre) de l'ordre de 1 à 2 cm lorsque trois satellites DORIS sont disponibles. Des développements logiciels nouveaux ont été réalisés au JPL (modification des paramètres d'orientation des satellites SPOT, récupération des données de flux géomagnétique) qui perturbaient les calculs des satellites les plus bas (SPOT).

Enfin, dans le cadre de la thèse de L. Morel (soutenance en mai 2001), des simulations ont été conduites avec le logiciel Gipsy/Oasis pour voir l'influence du système de référence (ou d'une position imprécise de certaines stations de poursuite DORIS) sur l'orbite du satellite Topex/Poseïdon et par voie de conséquence les erreurs systématiques induites dans les estimations du niveau des mers et de ses variations.

Fin 2000, CLS a commencé à diffuser les données des anciennes campagnes DORIS de localisation qui présentent pour l'IGN un intérêt géodésique particulier.

Thèse de Laurent Morel

De plus en plus fréquemment, les scientifiques tentent d'alerter l'opinion publique et les instances dirigeantes sur le phénomène de réchauffement climatique lié à la teneur croissante de notre atmosphère en gaz à effet de serre.

Dans ce contexte, l'étude de l'élévation du niveau des mers doit rendre compte de ce phénomène et permettre une meilleure compréhension des interactions océan-atmosphère.

Les récents progrès technologiques dans le domaine spatial ouvrent la voie à une estimation plus précise des variations séculaires du niveau marin. Avec l'altimétrie par satellite, on peut suivre la topographie des océans de manière globale mais aussi locale et pratiquement en temps réel. Grâce à la connaissance de la position précise du satellite dans un système de référence et à la mesure de distance entre le satellite et la surface instantanée de la mer, les océanographes parviennent à estimer les variations du niveau des mers avec des précisions inférieures au mm/an. De telles performances reposent sur la connaissance implicite du niveau zéro et de son évolution au cours du temps, paramètres correspondant en pratique aux caractéristiques du système de référence dans lequel sont exprimés les résultats, en particulier l'échelle et l'origine de ce système.

Cette thèse se proposait d'apprécier l'influence des systèmes de référence sur la détermination de l'orbite précise du satellite et par ce biais sur les résultats récents des variations du niveau des mers. Cette étude métrologique basée sur les données DORIS du satellite TOPEX/Poséidon a permis grâce à des simulations numériques de déterminer des fonctions de transfert entre les incertitudes inhérentes aux réalisations des systèmes de référence et les résultats précédemment cités.

Cette étude repose sur le constat suivant : bien que nous souhaitions et que parfois même nous supposions être toujours dans un unique système de référence invariant, les réalisations de ce système que nous choisissons par l'adoption de tel ou tel jeu de coordonnées de stations présentent des différences absolument non négligeables lorsqu'on aborde les applications altimétriques. Même en comparant les jeux les plus robustes, on observe des instabilités du facteur d'échelle et de l'origine respectivement de l'ordre de 0,25 ppb/an (1,6 mm/an sur l'altitude des stations) et 0,3 cm/an. Pouvons-nous alors raisonnablement comparer ou associer aux travers des calculs multi-satellites qui sont réalisés en altimétrie des réalisations différentes de système de référence ? Quelle est en particulier la sensibilité de l'estimation du niveau des mers au choix de tel ou tel repère de référence ?

Si l'on s'en tient, dans un premier temps, au facteur d'échelle, les simulations ont montré que cette caractéristique du système de référence n'entraînait pas de conséquences sur l'estimation du niveau des mers. Au regard de l'échelle, on peut donc choisir des repères de référence différents, même si des erreurs radiales d'orbite à la période de révolution du satellite apparaissent, aucun biais systématique n'existe, à la fois pour la position du satellite et pour l'estimation du niveau des mers qui en découle. Si l'échelle du système de référence final ne vient pas du repère de référence initial choisi pour les coordonnées de station de poursuite du satellite, on peut supposer qu'elle doit être fonction du champ de gravité et plus particulièrement de la valeur conventionnelle de GM.

Dans un second temps, on a poursuivi l'étude avec l'origine du système de référence qui se caractérise par des mouvements de translations selon les trois axes géocentriques. Là encore, nous n'avons relevé aucun biais systématique sur la position radiale du satellite quelque soit la translation considérée. Par contre, nos calculs ont montré sans ambiguïté un systématisme sur la composante Z de la position géocentrique du satellite lors d'une translation selon l'axe Z (fonction de transfert : TZ de 1 cm donne 7,4 mm de biais sur la composante Z du satellite).

Cette caractéristique ne se retrouve pas dans le cas des translations en X et Y car ces deux directions tournent dans le repère inertiel à la différence de l'axe Z qui est bien une direction privilégiée. Comme pour le facteur d'échelle, le choix du repère de référence vis-à-vis de l'origine du système n'a pas de conséquence sur la position radiale moyenne du satellite, cependant on observe une augmentation significative des erreurs radiales d'orbite à la période orbitale proportionnelle à la translation selon l'axe Z. Lors de l'estimation du niveau des mers, on calcule une moyenne de ces erreurs radiales au dessus des océans pour voir l'effet des translations. La moyenne nulle dans le cas de l'orbite ne l'est plus pour le niveau des mers compte tenu d'une répartition inégale des océans entre les deux hémisphères. La surabondance des points intervenant pour cette moyenne dans l'hémisphère Sud (environ 20 % en plus) biaise le résultat.

On obtient alors la fonction de transfert suivante, une incertitude de + 1 cm sur la composante Z de l'origine du repère de référence amènera un décalage de - 1,4 mm sur le niveau des mers. Si l'on rapporte cette fonction aux ordres de grandeurs précédemment cités pour les incertitudes des réalisations de système de référence, on constate qu'elles n'entraînent qu'une faible dérive sur l'estimation du niveau des mers (0,4 mm/an). Le choix des références géodésiques n'apparaît donc pas primordial pour JASON même s'il est évident que sur le long terme une dérive dans l'estimation du niveau des mers viendra perturber les résultats.

Cela justifie que l'on continue à améliorer les réalisations de système de référence et en particulier à chercher une meilleure stabilité de l'origine pour les applications altimétriques.

Après avoir détaillé ces aspects globaux d'effets de système de référence, on peut aborder la cohérence interne des stations à l'intérieur de ces repères afin d'étudier quelle est la sensibilité de l'orbite et l'influence sur l'estimation du niveau des mers d'une coordonnée de station erronée. Nos calculs de simulation nous ont permis de conclure qu'une erreur dans une coordonnée de station (quelque soit la direction) ne créait pas de systématisme sur la composante radiale du satellite mais une augmentation des erreurs à la période orbitale, conséquence largement induite par un décalage de l'orbite selon l'axe Z. Pour les mêmes raisons de répartition hémisphérique des océans évoqués auparavant, il s'ensuit des systématismes significatifs sur l'estimation du niveau des mers que l'on peut résumer ainsi.

On verra apparaître des biais sur le niveau des mers supérieur à 1 mm d'une part lorsque l'altitude d'une station dont la latitude est proche de l'inclinaison d'orbite sera perturbée de plus de 10 cm et d'autre part lorsque la latitude d'une station isolée avec beaucoup de mesures sera perturbée également de plus de 10 cm.

Si l'on applique ces fonctions de transfert aux incertitudes actuelles des positions de station DORIS dans l'ITRF97, on constate que ces systématismes deviendront importants dans quelques années seulement lorsque les incertitudes sur les positions de station auront augmenté compte tenu de l'éloignement de la période des données et de l'incertitude sur les vitesses de station.

Au vu des fonctions de transfert établies par cette thèse, le choix des références géodésiques peut apparaître comme secondaire mais une mission altimétrique peut durer plus de dix ans et générer alors des incertitudes importantes provenant des références géodésiques établies avec des données de géodésie spatiale antérieures au début de mission. Il faut par conséquent continuer dans la voie de l'amélioration des réalisations de système de référence pour pouvoir donner toute confiance aux futures estimations des variations du niveau des mers par altimétrie spatiale.

Publications

[ALTAMIMI 00] Z. Altamimi : *ITRF Status and plans for ITRF 2000,* in Proceedings of the International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2000 General Meeting, Febr. 21-24, Kötzing, Germany, NASA / CP-2000-209893, pp 57-61, IGN, ENSG, LAREG, 2000.

[ALTAMIMI 00] Z. Altamimi : *Relationship between ITRS, ETRS 89 and WGS 84,* in Proceedings of the FIG Seminar " The Mediterranean Surveyor in the new millenium ", Malta, 18-21 Sept. 2000, 6 pages, IGN, ENSG, LAREG, 2000.

[ALTAMIMI, BOUCHER 00] Z. Altamimi & C. Boucher : *GLONASS and the Internationale Terrestrial Reference System,* in Proceedings of the IGEX-98 Workshop, Sept. 13-14, 1999, Nashville, Tennessee, USA Ed. by J. A. Slater, C. E. Noll, K. T. Gowey, IGS Central Bureau, JPL, Pasadena, California, USA, pp 37-48.

[BEAUDICEL et al 00] F. Beauducel, F.-H. Cornet, E. Suhanto, T. Duquesnoy and M. Kasser : *Constraints on magma flux from displacement data at Merapi volcano,* Java (Indonesia), in Journ. Geophys. Res., Vol 105, B4, pp. 8193-8203.

[BOUIN 00] M.-N. Bouin : *New Plate Motion and Glacial Rebound Evidences in Antarctica derived from GPS data analysis, Gravity,* IAG International Symposium on Geoid and Geodynamics 2000, Banff (Canada), 31 juil - 4 août 2000, IGN, ENSG, LAREG, 2000.

[BOUIN, VIGNY 00] M.-N. Bouin and C. Vigny : *New constraints on Antarctic plate motion and deformation from GPS data,* in Journal of Geophysical Research, 105 (B12), pp 28 279-28 293, IGN, ENSG, LAREG, 2000.

[CALAIS et al 00] E. Calais, J.-M. Nocquet and A. Aufranc : *GPS network in the Upper Rhine Graben, EUCOR-URGENT project,* First Annual Scientific Workshop, 10-13 juillet 2000, Freibourg i. Br, IGN, ENSG, LAREG, 2000.

[CALAIS et al 00] E. Calais, R. Bayer , J. Chéry , F. Cotton, E. Doerflinger, M. Flouzat, F. Jouanne, M. Kasser, M. Laplanche, D. Maillard, J. Martinod, F. Mathieu, Ph. Nicolon, J.-M. Nocquet, O. Scotti, L. Serrurier, M. Tardy, C. Vigny & M. Regal : *Réseau GPS permanent dans les Alpes occidentales. Configuration et premiers résultats / REGAL ;* a permanent GPS network in the Western Alps. Configuration and first results. C.R. Acad. Sci. Ser. II, 331, 435-442, 2000a, IGN, ENSG, LAREG, 2000.

[DEHANT et al 00] V. Dehant, M. Feissel, O. de Viron, M. Yseboodt, C. Bizouard : *Analysis of the residuals between theoretical nutations and VLBI observations (poster),* Ass. Géné. De l'Union Astronomique Internationale, août 2000, IGN, ENSG, LAREG, 2000.

[FEISSEL 00] M. Feissel : *Détermination des nutations de la Terre et stabilité du référentiel extragalactique,* 2ème colloque AGRET, 8-10 novembre 2000, Grasse (F), IGN, ENSG, LAREG, 2000.

[FEISSEL 00] M. Feissel : *DOMES numbers and IERS source designations as normalized names in IVS operation,* 2000 meeting of the International VLBI Service for geodesy and astrometry (IVS), Kötzting (Allemagne), 21-25 fév. 2000, IGN, ENSG, LAREG, 2000.

[FEISSEL 00] M. Feissel : *FAGS services as seen from the IUGG/IAG,* FAGS Council, Toulouse (F), 20 mars 2000, IGN, ENSG, LAREG, 2000.

[FEISSEL 00] M. Feissel : *Report on the poll about the role of IAG,* in Proc. IAG Retreat 2000, Pasadena (USA), 14-16 fév. 2000, IGN, ENSG, LAREG, 2000.

[FEISSEL 00] M. Feissel : *Scientific services in support to reasearch in Geodesy and Geodynamics,* in Proc. IAG Symposium, Birmingham (UK), July 1999, IGN, ENSG, LAREG, 2000.

[FEISSEL 00] M. Feissel : *Stabilité du repère de référence céleste international,* Journées Recherche de l'IGN, 15 mars 2000, IGN, ENSG, LAREG, 2000.

[FEISSEL 00] M. Feissel : *Variabilité de radiosources extragalactiques compactes,* Séminaire Observatoire de la Côte d'Azur, 27 mars 2000, IGN, ENSG, LAREG, 2000.

[FEISSEL, ALTAMIMI 00] M. Feissel & Z. Altamimi : *ITRF colocation sites,* ITRF Workshop, 2-3 novembre 2000, Marne la Vallée, IGN, ENSG, LAREG, 2000.

[FEISSEL, GONTIER 00] M. Feissel and A.-M. Gontier : *Stability of ICRF, a time series approach,* in Proc. GM2000 meeting of the International VLBI Service for geodesy and astrometry (IVS), Kötzting (Allemagne), 21-25 fév. 2000, IGN, ENSG, LAREG, 2000.

[FEISSEL, WILLIS 00] M. Feissel and P. Willis : *Interaction between scientific research and services,* in Proc DORIS Days, Toulouse (F), 2-4 mai 2000, IGN, ENSG, LAREG, 2000.

[GONTIER et al 00] A.-M. Gontier, M. Feissel and N. Essaifi : *IVS Analysis Center OPAR at Paris Observatory. Automatic analysis of the 24 hrs sessions (poster), 2000* Meeting of the International VLBI Service for geodesy and astrometry (IVS), Kötzting (Allemagne), 21-25 fév. 2000, IGN, ENSG, LAREG, 2000.

[KASSER 00] M. Kasser : *Fiche technique du CNIG n° 36*, 136 bis rue de Grenelle, 75700 Paris, 8 pages, IGN, ENSG, LAREG, 2000.

[KASSER 00] M. Kasser : *FIG : Motion culturelle approuvée,* in Géomètre n° 7, juillet 2000, p. 22, IGN, ENSG, LAREG, 2000.

[KASSER 00] M. Kasser : *FIG Les méditerranéens se réunissent à Malte,* in Géomètre n° 10, octobre 2000, p. 17, IGN, ENSG, LAREG, 2000.

[KASSER 00] M. Kasser : *La FIG face à l'harmonisation des compétences et des langues,* in Géomètre n° 12, Décembre 2000, p. 22, IGN, ENSG, LAREG, 2000.

[KASSER 00] M. Kasser : *Les Emplois de methodologies GPS dans les SIG,* in Actes des conférences MARI, Paris (F), 18 avril 2000, Ed. Sté ORTECH, CD-ROM, 5 pages, IGN, ENSG, LAREG, 2000.

[KASSER 00] M. Kasser : *Les Forum GPS : un besoin considérable d'informations,* in Géomètre n° 11, novembre 2000, p. 17, IGN, ENSG, LAREG, 2000.

[KASSER 00] M. Kasser : *Les instruments de l'arpentage,* in : 2000 ans d'arpentage, Edit. Publi-Topex, 2000, pp. 60-65, IGN, ENSG, LAREG, 2000.

[KASSER 00] M. Kasser : *Les journées GPS 2000 du Ministère de l'Équipement,* in Géomètre n° 8-9, août-septembre 2000, p. 16, IGN, ENSG, LAREG, 2000.

[KASSER 00] M. Kasser : *Les Navsat 2000 affiche la montée en puissance de Galileo,* in Géomètre n° 7, juillet 2000, p. 15, IGN, ENSG, LAREG, 2000.

[KASSER 00] M. Kasser : *Les stations GPS permanentes, une économie collective,* in Géomètre n° 3, mars 2000, pp 34-38, IGN, ENSG, LAREG, 2000.

[KASSER 00] M. Kasser : *New Modern Height Determination Techniques,* in Proceedings of the FIG Working Week Prague 2000, J. Weigel, Brno Univ. of Technology, CD-ROM, 6 pages, IGN, ENSG, LAREG, 2000.

[KASSER 00] M. Kasser : *Nivellement et GPS : l'entretien de la référence nationale altimétrique,* in Bull. de l'INCT, 2000, N° 6, pp. 16-21, IGN, ENSG, LAREG, 2000.

[KASSER 00] M. Kasser : *The new French policy for Geodesy and Levelling, in Proceedings of the FIG Seminar " The Mediterranean Surveyor in the new millenium ",* Malta, 18-21 sept. 2000, 6 pages, IGN, ENSG, LAREG, 2000.

[KASSER, EGELS 00] M. Kasser and Y. Egels : *Geometric surveying of landlide movements, in " Landslides in the Thick Loess Terrain of North East China" ,* John Wiley & sons, Edit. Ed. Derbyshire, (286 p.), pp. 263-277, IGN, ENSG, LAREG, 2000.

[KASSER, EGELS 00] M. Kasser and Y. Egels : *Slope instability : survey monitoring. in " Landslides in the Thick Loess Terrain of North East China" ,* John Wiley & sons, Edit. Ed. Derbyshire, (286 p.), pp 219-224, IGN, ENSG, LAREG, 2000.

[KOUBA et al 00] J. Kouba, M. Feissel and R. Neilan : *The IAG mission, role and organization from the perspective of IAG services,* in Proc. IAG Retreat 2000, Pasadena (USA), 14-16 fév. 2000, IGN, ENSG, LAREG, 2000.

[MUNIER, KASSER 00] Ph. Munier & M. Kasser : *L'image satellite et la prise de vue aérienne : chacune ses atouts,* in Géomètre n° 10, octobre 2000, p. 34-35, IGN, ENSG, LAREG, 2000.

[NEILAN et al 00] R. Neilan, G. Beutler, M. Feissel, J. Kouba C. Reigber and T. Springer *: GPS measurements of Earth rotation - The contributions of the International GPS Service*, European Geophys. Soc., avril 2000, Nice (F), IGN, ENSG, LAREG, 2000.

[NICOLAS et al 00] J. Nicolas, F. Pierron, M. Kasser, P. Exertier, P. Bonnefond, F. Barlier & J. Haase : *French Transportable Laser Ranging Station* : scientific objectives, technical features, and performance, in Applied Optics, vol. 39, n° 3, pp. 402-410, IGN, ENSG, LAREG, 2000.

[NOCQUET et al 00] J.-M. Nocquet, E. Calais & Z. Altamimi : *Champ de vitesse en France et en Europe occidentale obtenus par différentes solutions de géodésie spatiale,* Réunion des Sciences de la Terre, Paris, 17-21 avril 2000, IGN, ENSG, LAREG, 2000.

[NOCQUET et al 00] J.-M. Nocquet, E. Calais & Z. Altamimi : *Intraplate deformation in western Europe, Eos Trans. American Geophysical Union,* Fall Meet. Suppl., San Francisco (USA), 15-19 décembre 2000, IGN, ENSG, LAREG, 2000.

[NOCQUET et al 00] J.-M. Nocquet, E. Calais & Z. Altamimi : *Velocity field in Western Europe and tectonics implications,* European Geophysical Society, Nice (F), 25-29 avril 2000.

[NOCQUET et al 01] J.-M. Nocquet, E. Calais, Z. Altamimi, P. Sillard and C. Boucher *: Intraplate deformation in Western Europe deduced from an analysis of he ITRF97 velocity field,* in J. Geophys. Res., sous presse 2001, IGN, ENSG, LAREG, 2001.

[NOCQUET, CALAIS 01] J.-M. Nocquet & E. Calais : *Étude de la stabilité de la référence géodésique nationale - implications géophysiques,* in Actes du Colloque Agret, Grasse (F), 8-10 novembre 2000, Institut Géographique National, 2001.

[WILLIS 00] P. Willis & J. Dow : *Potential interest of the IGS for the Galileo system,* présenté à l'IGS Analysis Workshop, Washington (USA), septembre 2000, GPS Solutions, 4, 2, IGN, ENSG, LAREG, 2000.

[WILLIS 00] P. Willis : *La campagne internationale GLONASS : IGEX-98,* in Revue Navigation, 48, 189, pp. 47-52, janvier 2000, IGN, ENSG, LAREG, 2000.

[WILLIS 00] P. Willis : *L'impact en géodésie des systèmes de radionavigation par satellites, GPS et GLONASS, un défi pour Galileo,* présenté à NAVSAT 2000, Paris (F), juin 2000, in Revue XYZ, 84, 2000, 3, pp. 42-45, IGN, ENSG, LAREG, 2000.

B. Quelques actions marquantes

B.1 Appariement de clichés terrestres guidé par un modèle : application à la construction de mosaïque de linéaire de rue

Jocelyn Marchadier

Introduction

La motivation initiale de notre étude est le recalage d'un modèle tridimensionnel de type TRAPU et de clichés terrestres haute résolution. Les paramètres de prises de vue ainsi obtenus permettraient l'obtention d'un modèle tridimensionnel photoréaliste. Cette application nécessite la résolution de plusieurs problèmes, dont la mise en place et la fusion de textures, nécessaires à la gestion des occlusions. Certains de ces problèmes liés à la précision géométrique du modèle TRAPU ont été présentés dans le précédent Bulletin d'Information de l'IGN : n° 71 (1999/3).

Nous pouvons mettre en évidence la différence de géométrie entre le modèle initial, reconstruit à partir de photographies aériennes et la réalité présente sur les images. Ce problème, gênant lors du rendu d'un modèle texturé, est crucial pour l'obtention d'un algorithme d'appariement automatique robuste. Seule une compensation globale permettrait d'accroître la robustesse et la fiabilité du procédé.

La chaîne de traitement automatique permettant la mise en place des clichés peut être décomposée en plusieurs étapes :

- mise en correspondance de ces primitives entre images consécutives ;
- mise en place robuste de la bande d'images ;
- mise en correspondance de primitives image avec le modèle ;
- calcul d'une compensation globale robuste.

Nous présentons ici un ensemble de méthodes spécifique au contexte de notre étude qui peuvent être mise en œuvre pour résoudre les trois premières étapes décrites ci-dessus. Ces méthodes sont fiables et efficaces, ne nécessitant que peu de temps de calcul. À l'issue de la chaîne de traitement proposée, une mosaïque permettant l'étude d'un linéaire de rue peut être présentée, formant ainsi un produit dérivé de la chaîne de traitements.

La première partie de cet article montre l'ensemble des données que nous avons utilisées. La deuxième partie est consacrée à un algorithme d'extraction de primitives que nous avons publié et une méthode fiable d'extraction de points de fuite.

Une méthode efficace d'obtention d'appariements initiaux est proposée dans la troisième partie de cet article. La quatrième partie met en évidence l'utilité de la connaissance des points de fuite principaux des clichés terrestres pour filtrer les appariements initiaux. La cinquième partie de l'article présente une petite mosaïque conçue de manière rudimentaire qui démontre les fonctionnalités des traitements.

Données initiales

Le site choisi pour nos tests est la rue du faubourg Saint Antoine à Paris. Le modèle TRAPU utilisé est d'une précision de 20 cm. Seules les gouttières ont été mesurées, le volume des bâtiments ayant été reconstruit par extrusion du périmètre des toits au niveau du sol, qui est ici modélisé par un plan.

Un ensemble de clichés des façades des bâtiments a été réalisé à l'aide d'un appareil photographique 24 x 36, doté d'un objectif grand angle d'une focale de 20 mm. Ils forment une bande de 80 % de recouvrement, la base est d'approximativement six mètres. Ils ont été numérisés avec un scanner Helava d'une bonne qualité radiométrique, puis sous-échantillonnés. La taille du pixel des images utilisées est de 40 μm, soit cinq centimètres sur une façade.

Les clichés sont fortement déformés et offrent la particularité d'avoir deux points de fuite principaux.

Les paramètres internes des prises de vues ont été calculés en utilisant la même méthode que celle qui a été utilisée pour le chantier d'Angkhor Vat.

À l'aide des données initiales des prises de vue, et de la position de la première prise de vue, il est possible d'obtenir une approximation des paramètres des prises de vue suivantes (figure B.1.2). Cette approximation peut-être également mesurée à l'aide d'un appareillage ou être affinée à l'aide de données comme les points de fuite des bâtiments.

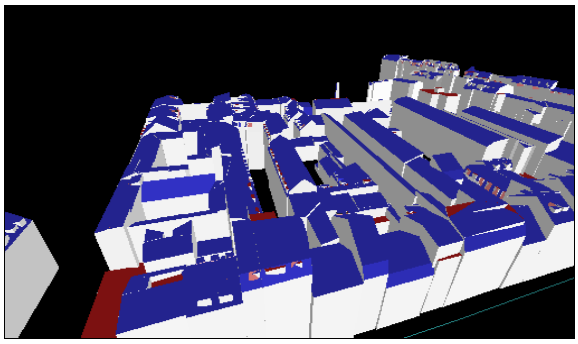


figure B.1.1 *: vue perspective du modèle TRAPU utilisé*

figure B.1.2 *: clichés terrestres*

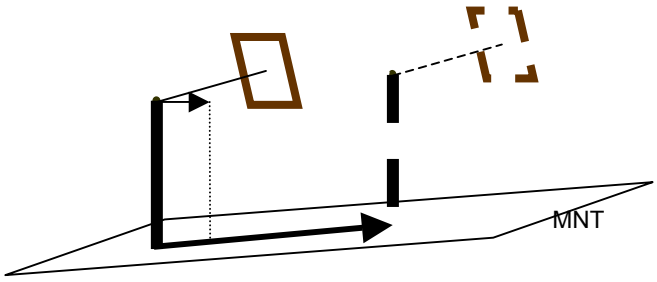


figure B.1.3 *: clichés terrestres*

Extraction de primitives

Les primitives utiles dans notre application sont les segments de droites et leurs extrémités, ainsi que les points de fuite principaux d'une image.

Segments de droites

Les algorithmes d'extraction de segments de droites proposés dans la littérature ne sont pas satisfaisants pour plusieurs raisons. Les extrémités des segments obtenus ne sont pas bien localisées et les algorithmes sont difficilement paramétrables. Nous avons développé un algorithme d'extraction de primitives linéaires connexes fiable ne nécessitant que deux paramètres [MARCHADIER, MICHELIN 99] [MARCHADIER et al 00].

L'originalité de ce travail réside dans la conservation d'une structure topologique (la carte de contours) obtenue à partir d'opérations bas niveau, et dans la formulation du problème d'extraction de segments de droites comme un problème d'optimisation d'un critère de sélection de modèles.

La carte de contours initiale peut être construite à l'aide d'algorithmes permettant l'obtention des crêtes du module du gradient de l'image initiale. Plusieurs algorithmes de ligne de partage des eaux ont été étudiés. L'algorithme de Marc Pierrot Deseilligny a été retenu et utilisé pour obtenir la carte de contours initiale. Cet algorithme a été testé sur des images terrestres (figure B.1.3). Un seuillage par hystérésis des courbes maximales locales permet de simplifier le résultat (figure B.1.4).

Les segments de droites (ou, plus généralement, les segments de courbes) sont extraits du graphe ainsi obtenu en optimisant une fonction de sélection de modèle.

Le critère utilisé dans l'algorithme développé est le critère de longueur de codage minimum, largement étudié dans la littérature de vision par ordinateur. Celui-ci réalise un compromis entre l'adaptation des données au modèle, caractérisée par la probabilité conditionnelle des données connaissant un modèle et ses paramètres, et la longueur de description du modèle.

$$s\,(c_j,\theta) = -\log P\,(c_j/\theta) + sizeof\,(m_i).$$

Les paramètres optimaux suivant ce critère pour un modèle donné sont ceux qui réalisent le maximum de vraisemblance.

Les données associées à chaque pixel du graphe sont ses coordonnées, ainsi que la direction du gradient au pixel considéré. Cette dernière permet de favoriser les chaînes de contours des régions homogènes des images. Le modèle de segment de droite est constitué de deux équations par point, de la forme suivante :

$$f(x_P, y_P, \theta_P; \theta, d) = \begin{bmatrix} x_P \cos\theta + y_P \sin\theta - d \\ \theta - \theta_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_{\hat{d},p} \\ -r_{\hat{\theta},p} \end{bmatrix} = 0$$

En considérant que les résidus des deux équations suivent des lois normales, et après un rapide développement, nous obtenons la fonction de sélection de modèle suivant pour chaque droite :

$$s(c_j, \hat{\theta}, \hat{d}) \approx n_j \log\left(2\pi \frac{\sigma_\theta \sigma_d}{\varepsilon_\theta \varepsilon_d}\right) + \frac{1}{2\ln 2}\left(\sum_P \left(\frac{r_{\hat{d},P}}{\sigma_d}\right)^2 + \sum_P \left(\frac{r_{\hat{\theta},P}}{\sigma_\theta}\right)^2\right) + (2+n_j)t_{real}$$

Cette fonction de coût peut être étendue à d'autre type de primitives, comme par exemple des segments d'ellipse.

Une contrainte supplémentaire permet d'ignorer les courbes ayant un petit coût, mais ne correspondant pas à une réalité image (figure B.1.3).

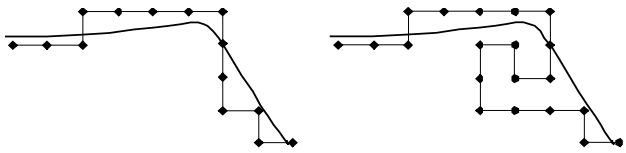


figure B.1.4 *: à gauche, une courbe admissible, à droite, une courbe rejetée*

Un modèle de bruit est inclus, de façon à écarter les points de contours qui ne sont pas significatifs.

La fonction minimisée est alors la somme des coûts des primitives (bruit ou segment de droites) réalisant une partition parfaite de la carte de contours. C'est un problème d'optimisation combinatoire qui ne peut être résolu qu'en examinant toutes les solutions possibles, ce qui est en pratique infaisable.

Nous avons développé un algorithme sous-optimal qui permet d'obtenir en un temps raisonnable une solution au problème. Cet algorithme est fondé sur une stratégie gloutonne assez rapide. Plusieurs critères de relaxation d'étiquette ont également été étudiés. Les deux seuls paramètres de l'algorithme sont les écarts types associés aux deux équations du modèle de segment de droite. Ceux-ci peuvent être estimés ou non, suivant le type de résultat souhaité.

Le résultat obtenu est satisfaisant (figures B.1.5, B.1.6 et B.1.7) et les extrémités de nombreux segments sont correctement localisées. Il est possible d'obtenir un algorithme fiable qui crée une segmentation d'une image en utilisant le même type de critère. Il faut pour cela prendre en compte des modèles de régions (texture, éclairement). Cet algorithme serait d'autant plus fiable qu'il utiliserait la dualité des modèles de régions et des modèles de contours. Faute de temps, nous n'avons pas pu étudier cet aspect.

figure B.1.5 : *image initiale*

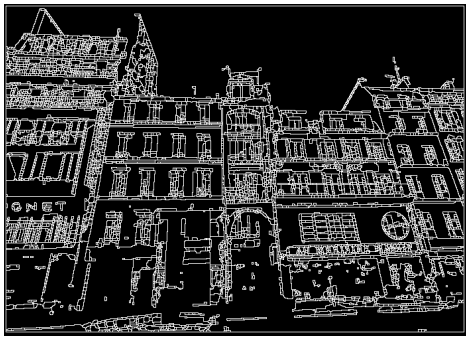


figure B.1.6 : *carte de contours*

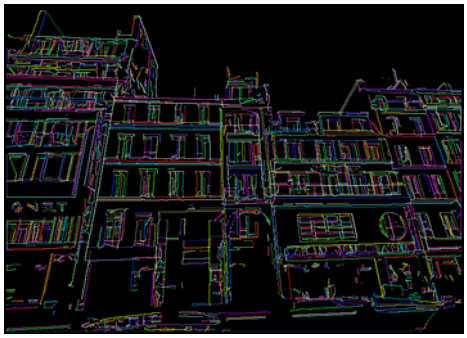


figure B.1.7 : *segments de droites*

Points de fuite

Nous avons développé une méthode permettant de calculer de façon précise la position des deux points de fuite principaux des images. Deux groupements de droites sont constitués. Chacun des groupes contient les droites qui participent éventuellement au faisceau de droite associé à un point de fuite. Une transformée de Hough peut éventuellement être utilisée pour déterminer les groupes initiaux de manière plus robuste. Dans notre application, nous avons utilisé une connaissance *a priori* sur le procédé de prise de vue. La position du point de fuite associé à chacun des groupes est déterminée à l'aide d'un estimateur robuste, qui sert à déterminer précisément la position du point de fuite et à éliminer les fautes.

Les équations utilisées lors de l'estimation d'un point de fuite sont de la forme :

$$\cos\,\theta_i\,(d_p, x_{i,j} - \cos\,\theta_p) + \sin\,\theta_i\,(d_p, y_{i,j} - \sin\,\theta_p) = 0$$

où $(x_{i,j}, y_{i,j})$ sont les coordonnées du point *j* appartenant au segment *i*, (θ_i, d_i) sont les paramètres de la droite support du segment i, et $(\theta_i\ ,\ d_p\ )$ sont les paramètres (sous forme de coordonnées polaires, d_p étant l'inverse de la distance du point à l'origine) du sommet du faisceau (point de fuite).

Ce type de paramétrage nous permet de prendre en compte l'ensemble des points de fuite possibles.

La technique robuste utilisée est composée en deux étapes. La première étape est l'estimation à l'aide d'un estimateur par consensus. L'estimateur retenu est RANSAC. La seconde étape est une technique d'élimination de fautes par une méthode par bouclage.

À chaque itération de cet algorithme, un test du chi2 pour chaque droite participant au faisceau, rejetant les droites échouant le test et acceptant les droites pour une nouvelle itération dans le cas contraire. Une nouvelle estimation est alors menée. L'algorithme s'arrête quand les droites sélectionnées sont stables entre deux itérations successives.

Appariements initiaux guidés par le modèle

Le problème d'appariement automatique de primitives entre images est un problème assez classique en vision par ordinateur. Les primitives utilisées peuvent être des points caractéristiques d'une image ou des primitives plus complexes (chaînes de contours, segments de droite…), suivant la problématique sous-jacente.

Trois grandes problématiques peuvent nécessiter un algorithme d'appariement :

- déterminer les paramètres de prise de vue d'une série d'images ;
- la reconstruction d'une scène ;
- l'indexation.

La fiabilité du processus d'appariement (qui peut être caractérisée par la proportion d'appariements corrects obtenus) est directement dépendante de la précision des paramètres de prise de vue. Ceux-ci ne sont déterminés précisément qu'avec un ensemble d'appariements fiables. Ce dernier point met en évidence la complexité de la première problématique décrite, celle qui nous intéresse.

Des connaissances supplémentaires sur le type d'image analysée peuvent donner des contraintes qui ont une double utilité : elles permettent de fiabiliser le processus d'appariement et de limiter la combinatoire de celui-ci. Les contraintes de nature structurelle peuvent être introduites à l'aide de différents types de graphes mettant en relation les primitives d'une image. Des contraintes géométriques sont aussi classiquement utilisées, comme la limitation de la profondeur de la scène ou la contrainte épipolaire.

Les contraintes de nature radiométrique (corrélation, mesures de similitude invariantes à des transformations géométriques) sont généralement considérées. Les procédés d'appariements non denses peuvent être regroupés en deux paradigmes, à savoir la mise en relation de graphes (isomorphisme…) et le paradigme hypothèse-vérification (techniques de clustering, estimation robuste du modèle géométrique décrit…). Nous proposons ici une stratégie d'appariement qui est relativement efficace (en temps de calcul) qui repose sur l'utilisation de contraintes fournies par le modèle tridimensionnel, le procédé de prise de vue, et l'environnement photographié.

Le modèle 3-D fournit des informations de nature différente :

- des informations intrinsèques : les primitives modélisées, leurs relations géométrique (angles entre deux segments de droites, droites parallèles…) et topologiques (adjacence de primitives) ;
- des informations extrinsèques qui peuvent être utilisées quand une approximation des paramètres de prise de vue est connue.

Nous supposons que les paramètres de prises de vue sont approximativement connus. Dans une application donnée, ceux-ci peuvent être trouvés avec un appareillage adéquat (gyroscope, GPS, capteur Polhemus), ou par prédiction de mouvement (connaissance *a priori* sur le procédé de prise de vue, extrapolation de mouvement).

Focalisation

Dans notre application, nous restreignons l'espace de recherche entre primitives (segments de droites et points) d'images différentes en créant un groupe de segments potentiellement homologues par image et par segment du modèle 3-D. Ceux-ci sont constitués en sélectionnant les segments détectés sur les images se trouvant à l'intérieur d'une zone autour de la projection de chaque segment visible du modèle (figure B.1.8). La taille de cette zone est déterminée en fonction de l'incertitude des paramètres de prises de vue.

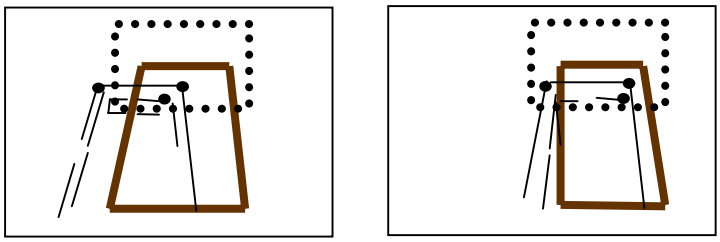


figure B.1.8 : *restriction de l'espace de recherche*

Contrainte de recouvrement

Un filtrage supplémentaire est effectué au sein de chaque groupe de segments homologues associé à un segment du modèle. Celui-ci élimine les segments images potentiellement homologues dont les « projections » sur la droite supportant le segment du modèle considéré sont disjointes.

La projection d'un segment d'une image sur une droite du modèle est obtenue en trouvant les intersections des plans perpendiculaires au plan formé par le centre optique d'une image et le segment du modèle considéré, et passant par le centre optique et chaque extrémité d'un segment de l'image, avec la droite supportant le segment modèle (figure B.1.9). Cette contrainte est une généralisation en multi-vues de la contrainte utilisée par Zhang avec deux vues [ZHANG 96].

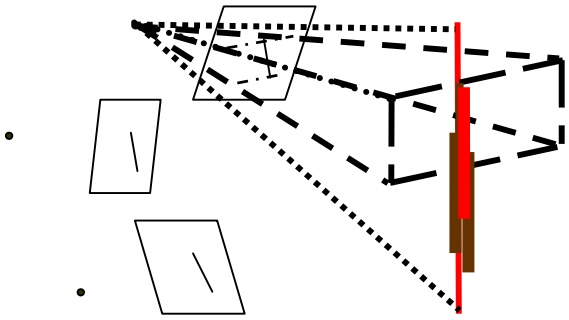


figure B.1.9 : *contrainte de recouvrement*

Appariements des extrémités

Les appariements de points utilisés dans la suite de cet article sont déduits des groupes de segments homologues. Les couples d'extrémité des segments retenus sont ceux réalisant le maximum de corrélation sur un petit voisinage. L'ensemble de ces opérations donne environ 60 % d'appariements corrects avec le meilleur jeu de paramètres. L'un des points faibles de la méthode est l'utilisation d'une corrélation qui s'avère peu robuste face à des déformations géométriques importantes.

Contrainte des points de fuite principaux

Un filtrage supplémentaire peut être réalisé à l'aide d'une approche photogrammétrique. Un estimateur robuste de la géométrie épipolaire pour un couple de clichés est classiquement utilisé. Nous avons conçu un nouvel outil de filtrage « géométrique » qui utilise les points de fuite des images.

Cette méthode fonctionne pour des points à peu près coplanaires. Elle tire partie de la connaissance de deux points de fuite issus de direction perpendiculaire sur chacune des images et de leur correspondance entre des images successives. Elle peut être décomposée en deux étapes distinctes, ce qui permet de simplifier énormément les différents calculs.

Pendant la première étape, la transformation qui permet de redresser une image est calculée, connaissant les deux points de fuite principaux. Puis, la transformation qui permet de superposer deux images consécutives est déterminée.

Redressement d'une image

Appelons P_1, P_2 : deux points de fuite principaux d'une image, exprimés en coordonnées homogènes. Il est possible de calculer l'homographie H qui envoie les points P_1, P_2 à l'infini $P_{1\infty}$, $P_{2\infty}$. Cette transformation s'exprime simplement à l'aide d'une application linéaire dans le plan projectif :

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ a & b & -f \end{bmatrix}$$

Les points de fuite obtenus ne sont pas nécessairement orthogonaux, ce qui est requis pour un éventuel redressement des images. Il est alors nécessaire de calculer le cisaillement C tel que $P_{1\infty}{}^{t}P_{2\infty} = 0$. Celui-ci s'exprime de manière simple. À l'aide de la seule connaissance de deux points de fuite principaux, nous pouvons calculer un redressement simple, en composant les deux transformations précédentes.

Cette transformation s'écrit, toujours à l'aide d'une formulation projective : H' = CH. La figure B.1.10 (page suivante) montre l'effet de cette transformation (à droite) sur une image fortement déformée par la perspective (à gauche).

figure B.1.10 : *redressement à l'aide des deux points de fuite principaux*

Images consécutives

Deux clichés successifs d'une bande sont, une fois redressés, superposables à une translation et à une homothétie près. Plus formellement, deux points homologues *P* et *P'* de deux clichés successifs suivent la relation :

$$P = \begin{bmatrix} h_x & 0 & t_x \\ 0 & h_y & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} P'$$

Les quatre paramètres de cette contrainte sont estimés à l'aide de tous les homologues d'un couple. L'estimateur employé est RANSAC, qui peut déterminer les paramètres d'un modèle acceptable avec plus de 50 % de fautes d'observation. L'estimation est très efficace en temps de calcul, car le modèle estimé est très simple.

Les « fautes » détectées sont : soit, des appariements réellement aberrants, soit, des homologues qui ne sont pas dans le plan défini de manière approximative par les façades des bâtiments. À l'issue de ce filtrage, la totalité des appariements sont corrects. Ils peuvent être utilisés pour calculer une orientation relative très fiable.

Construction d'une mosaïque

En réitérant le procédé décrit au paragraphe précédent sur chaque couple d'images successif, et en ramenant l'ensemble des images dans un repère associé au premier cliché, il est possible de construire une mosaïque d'un ensemble de façades d'une rue. La figure B.1.11, est constituée de trois clichés consécutifs.

Dans cet exemple, la superposition des images est réalisée à l'aide d'une simple moyenne des valeurs de chaque pixel, ce qui n'est évidemment pas satisfaisant, en particulier pour les problèmes d'occlusions.

figure B.1.11 : *une mosaïque*

Conclusion

Dans cet article, qui relate une partie des efforts de recherche que nous avons réalisés cette année, nous avons proposé quelques techniques qui permettent l'obtention d'appariements fiables entre images. Ces techniques n'ont pas fait encore l'objet de publication, bien qu'elles soient relativement innovantes.

Ces techniques, très spécifiques à notre problématique, sont efficaces et robustes. Leurs inclusions dans une chaîne de production complète peuvent être envisagées.

Référence

[GANG, ZHENGYOU 96] Gang Xu, Zhengyou Zhang *: Epipolar Geometry in Stereo, Motion and Object Recognition. Kluwer Academic* , volume 6 of Computational Imaging.and Vision, Kluwer Academic Publishers, 1996

Publications

[MARCHADIER et al 00] J. Marchadier, S. Michelin & Y. Egels : *A graph labelling approach for connected linear feature selection IAPR Workshop on Syntactic and Structural Pattern Recognition*, SSPR'2000, in Lecture Notes in Computer Science, n° 1876, laboratoire MATIS, IGN-SR 00-015/COM-JM, 2000.

[MARCHADIER, MICHELIN 99] J. Marchadier & S. Michelin *: Extraction de primitives linéaires connexes d'une carte de contours*, AFIG'99, laboratoire MATIS, IGN-SR 990028/COM-JM, 1999.

B.2 Géoréférencement automatique de feuilles cadastrales

Laurent Guigues et Jean-Marc Viglino

Introduction

À la suite du rapport Lengagne, la constitution du référentiel à grande échelle (RGE) est devenue une mission importante de l'IGN. Ce RGE « *doit contenir, sous forme numérique, divers objets géographiques cohérents entre eux et géoréférencés (notamment topographie, parcellaire cadastral, adresses, ortho-photographies)* » (Instruction du rapport Lengagne). Il doit couvrir la totalité du territoire national.

Plus particulièrement, et en coopération avec la Direction Générale des Impôts (DGI), l'IGN doit assurer :

- le rattachement du plan cadastral au système national de coordonnées ;
- la meilleure continuité possible de ces données (continuum) ;
- la cohérence de ces données avec les composantes topographiques et ortho-photographiques (BD TOPO et BD ORTHO) du RGE.

La tâche n'est pas aisée. L'ensemble des feuilles cadastrales représente une masse considérable de données (plus de 500.000 feuilles au format « grand aigle »). Leur orientation varie en fonction de la forme de la division de façon à tenir sur la feuille (comprenez : le nord n'est pas en haut de la page). L'échelle varie du 1 : 625 au 1 : 5 000. Certaines comportent des développements en marges (des extraits d'une partie de la feuille à une échelle différente, voir figure B.2.1). Le tout présenté dans des factures et qualités diverses (près de la moitié des planches sont des actualisations de fonds de Plan Napoléonien).

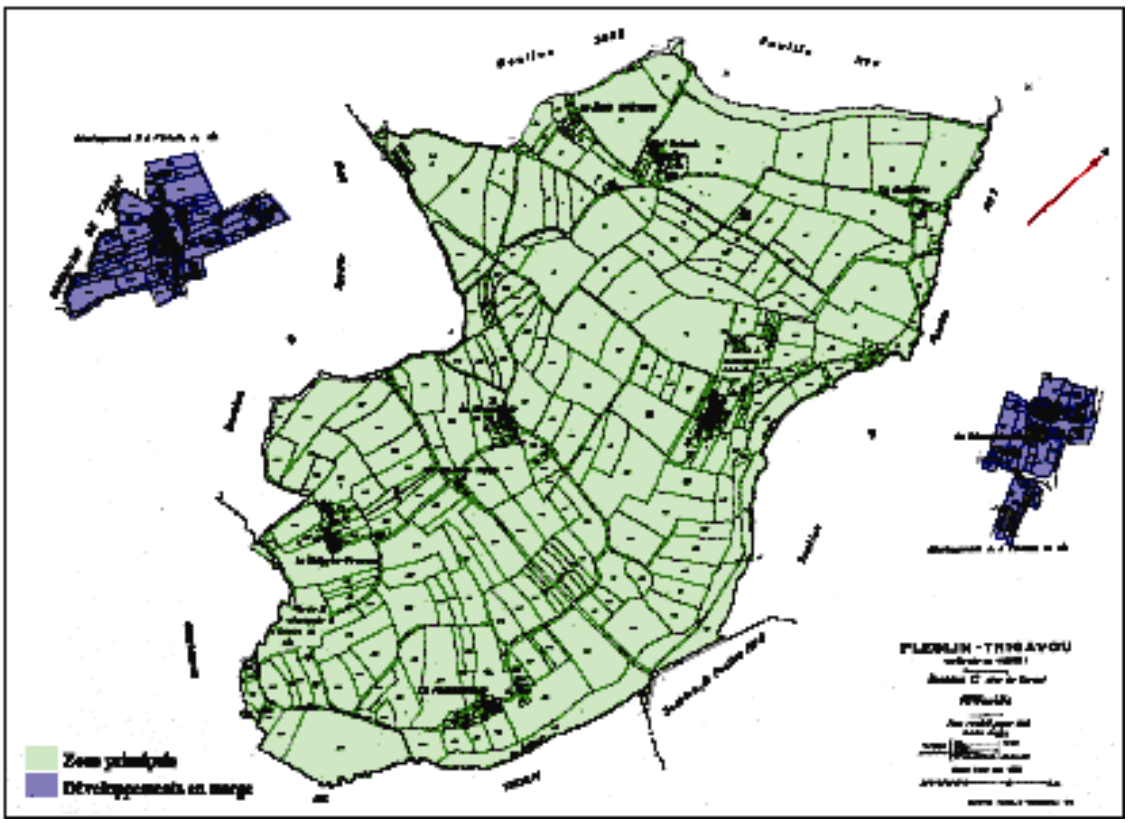


figure B.2.1 *: planche cadastrale de Pleslin-Trigavou, section C1*

Dans ce contexte, les recherches s'orientent autour de lectures couplées carte-image, dans le but d'obtenir :

- dans un premier temps, des outils d'aide à la manipulation, au calage et au géoréférencement de ces planches sur ortho-photographies ou sur bases de données (BD TOPO en particulier) ;
- dans un deuxième temps, les recherches se focalisent sur le recalage du cadastre sur ortho-photographie afin de faire coïncider la feuille cadastrale et les objets topographiques visibles sur la photo.

Recherche du continuum

Il s'agit de replacer les feuilles scannées par le Cadastre dans le référentiel national. Il ne s'agit pas de lambertiser le cadastre à proprement parler, mais plutôt de calculer un tableau d'assemblage des feuilles et de le placer dans le référentiel. Cette première opération servira de base à des opérations de calage plus fines (automatiques ou assistées).

Les communes sont découpées en sections cadastrales, chaque section correspondant à une feuille. On utilise la couche administrative de la BD CARTO comme référence absolue afin de décomposer le problème en le limitant à l'assemblage des feuilles d'une commune à l'intérieur de cette commune.

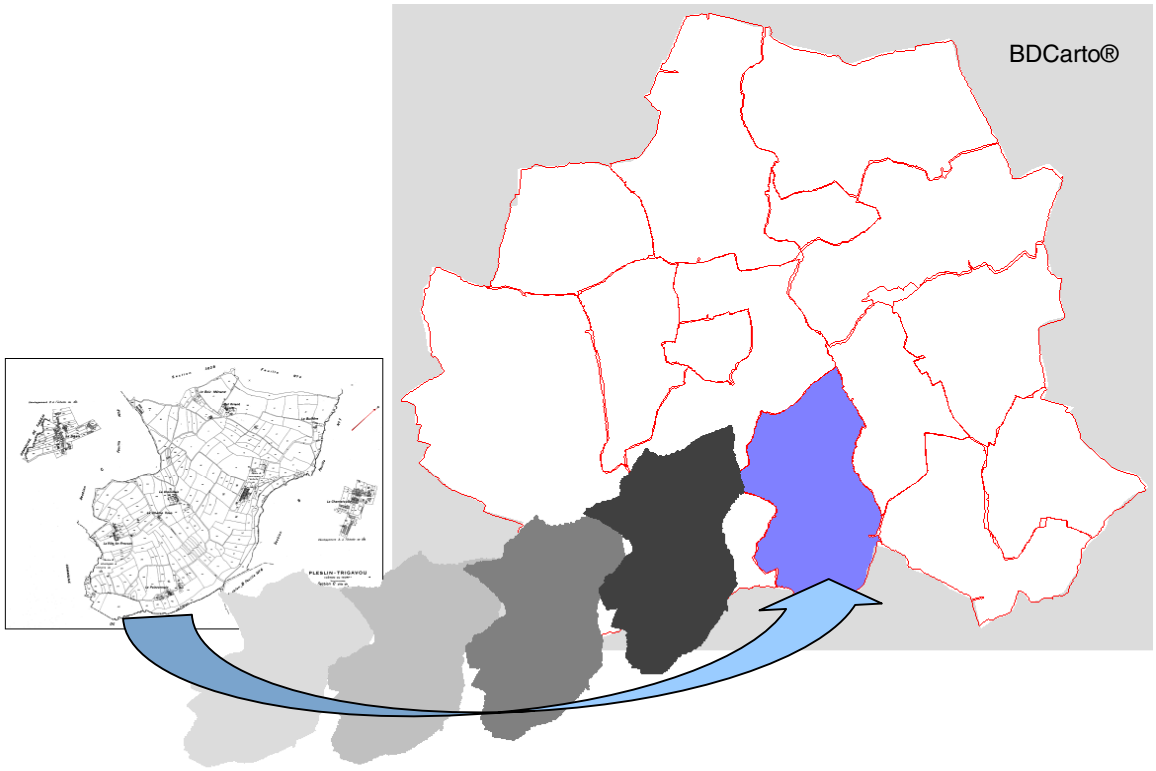


***figure B.2.2** : recherche de continuum : assemblage des sections sur la BD CARTO*

L'échelle de la carte est connue et intégrée au nom normalisé du fichier cadastral.

Le processus consiste donc à :

- retrouver l'orientation des feuilles cadastrales (retrouver le nord) ;
- extraire de la feuille la partie utile (la section proprement dite) et les développements en marge ;
- reconstruire le puzzle formé par l'ensemble des sections cadastrales à l'intérieur d'une commune BD CARTO.

Au final, un ajustement permet d'optimiser au mieux la position.

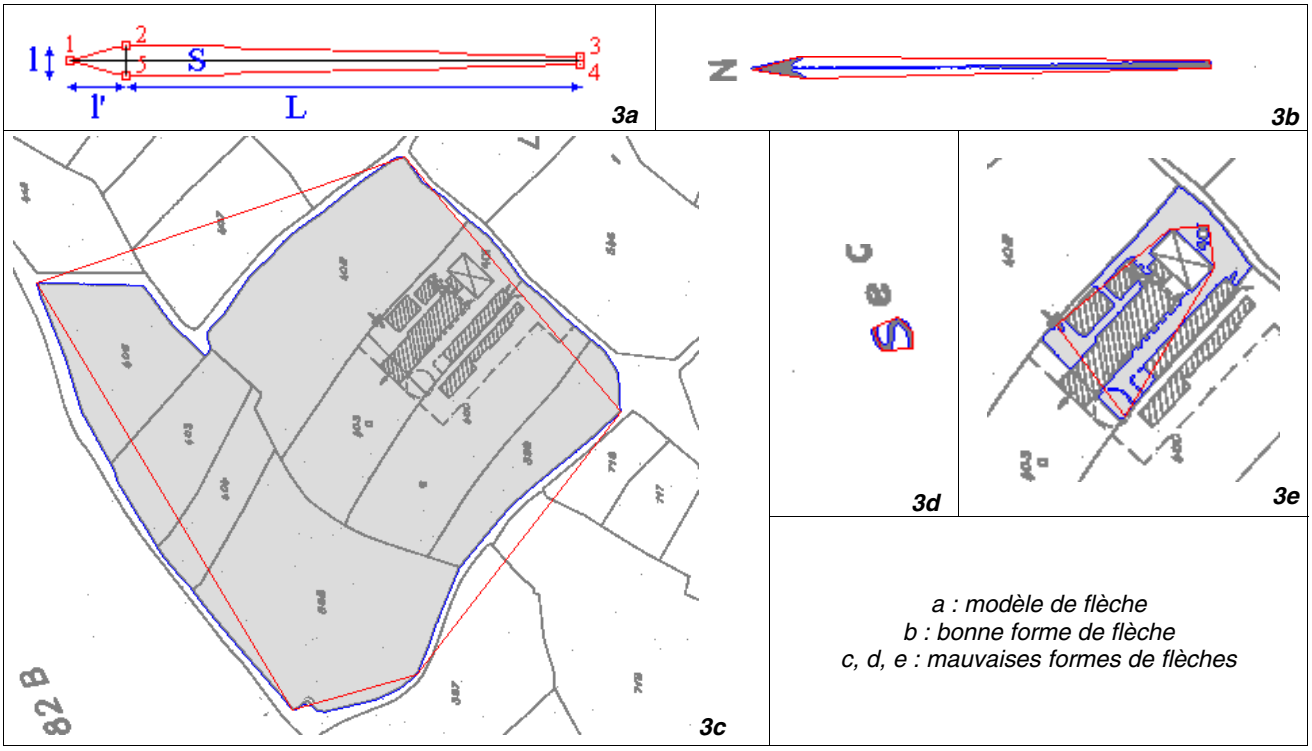
Recherche de la flèche du Nord

La première étape consiste à trouver l'orientation de la planche cadastrale. Elle est donnée par la flèche du Nord sur la carte.

On caractérise une flèche par sa forme qui dépend des paramètres de longueur L, largeur l, surface S et allongement de la pointe l'. On recherche donc, parmi les composantes connexes de la carte, celle qui répond le mieux aux critères définis par ces quatre paramètres. Pour cela, on recherche un polygone à cinq points, caractéristique de la forme. On constitue ce polygone en supprimant, un à un, les points du contour de la zone en commençant par ceux qui minimisent l'accroissement ou la diminution de surface de la forme.

Un premier passage, en sous échantillonnant l'image, permet de détecter les candidats possibles. Ils sont triés suivant la longueur de la pointe de la flèche par rapport à un modèle (c'est en effet la mesure qui caractérise le mieux les flèches du cadastre).

On extrait ensuite, en pleine résolution, la direction de la flèche : c'est la direction principale du nuage de points formant la flèche. On s'assure que c'est un axe de symétrie de la forme et l'on recalcule l'allongement de la flèche. Au final, on retient la forme ayant la meilleure symétrie et l'allongement de la flèche le plus proche du modèle.



a : modèle de flèche
b : bonne forme de flèche
c, d, e : mauvaises formes de flèches

figure B.2.3

Extraction des zones utiles et des développements en marge

Pour chaque feuille, on recherche l'ensemble des composantes connexes de la feuille. Par une suite d'opérations morphologiques, on regroupe les formes séparées de moins d'une largeur de route les unes des autres. On distingue alors la silhouette principale (la plus grande zone) et les développements en marge.

Dans certains cas, une silhouette peut être coupée en deux parties, à plus d'une largeur de route (par une route ou une rivière plus large). Il faut alors fusionner les zones ayant une frontière parallèle avec la silhouette principale, afin de regrouper deux parties disjointes. Pour cela, on calcule la somme des distances entre chaque zone (figure B.2.4, page suivante). Lorsque deux zones ont une frontière parallèle, cette somme est constante sur une bande reliant les deux silhouettes.

L'existence d'une telle bande est alors décelable par la présence d'un mode important dans l'histogramme des distances. Un seuil sur la longueur de la bande permet de sélectionner les zones à relier à la silhouette principale.

On ne retient pas les zones rectangulaires dont les bords sont parallèles au bord de feuille (cadre, cartouche, etc.). On obtient ainsi la zone utile de la feuille, comprenant la zone principale et les développements en marge.

Soit la fonction S, somme des distances des points du plan aux zones A et B :

$$S(P) = | PA | + | PB |$$

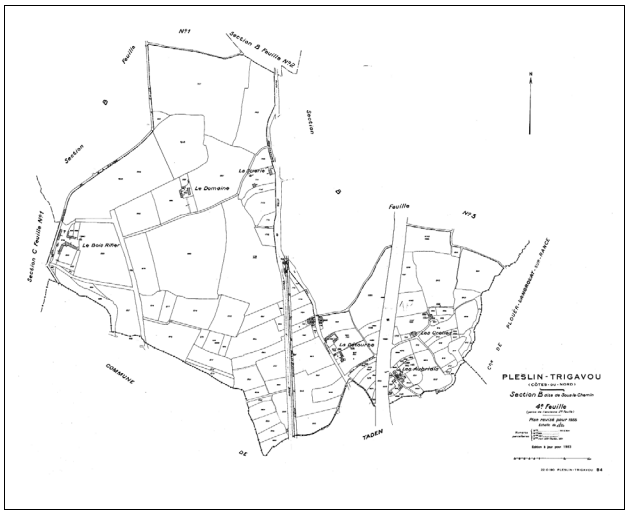
| PA | et | PB | étant la distance du point P aux zones A et B : | PA | = $\min_{(M \in A)}$ (PM).

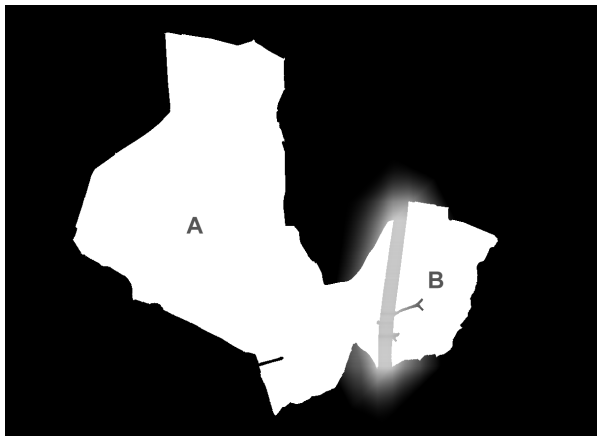
On appelle distance de A à B, notée d(A,B), le mode de l'histogramme des S(P) ($\forall$ P $\notin$ (A$\cup$B)).

Elle est réalisée à ε prêt sur une bande E des points du plan vérifiant | S(P) -d(A,B) | < ε.

On peut calculer la longueur de la bande :

Longueur de bande = Card(E) / d(A,B).





S : somme des distances d'un point à B et à A

zones fusionnées

***figure B.2.4** : fusion de zones disjointes*

Résolution du puzzle

Il s'agit maintenant d'assembler les zones principales des sections entre elles, à l'intérieur de la commune BD CARTO, comme on assemble des pièces dans un puzzle.

Assemblage deux à deux

On cherche, tout d'abord, à assembler les pièces deux à deux, en calculant des vecteurs d'assemblage en un certain nombre de points caractéristiques de la frontière des pièces (points de rupture, d'inflexion, milieu de segments). Ces vecteurs relient les points caractéristiques d'une section aux bords des autres sections pour lesquels la similarité de contour est la meilleure. C'est-à-dire pour lesquels la longueur d'accroche à ε près entre les frontières est maximale. Pour chaque vecteur d'assemblage connectant une pièce A à une pièce B, on s'assure qu'il y a réciprocité et qu'il existe un vecteur inverse connectant B à A.

L'ensemble des vecteurs d'assemblage de même norme et de même direction forme un vecteur d'attache (voir figure B.2.5, page suivante). On définit ainsi pour chaque pièce des vecteurs d'attache avec ses voisines et avec la limite de commune BD CARTO. On calcule pour chaque vecteur une confiance d'attache qui dépend de la longueur de frontière commune et de la surface de recouvrement entre les pièces.

$$\bullet = confiance = \frac{front^2}{front + over}$$

avec :front = longueur de la frontière commune (ensemble des points de la frontière de A à moins de ε de la frontière de B),

over = surface de recouvrement entre les pièces.

Plus la longueur de la frontière est grande et plus la confiance est forte. Plus le recouvrement est important et plus la confiance est faible. En fait, cette mesure est équivalente à une longueur d'attache entre les deux pièces.

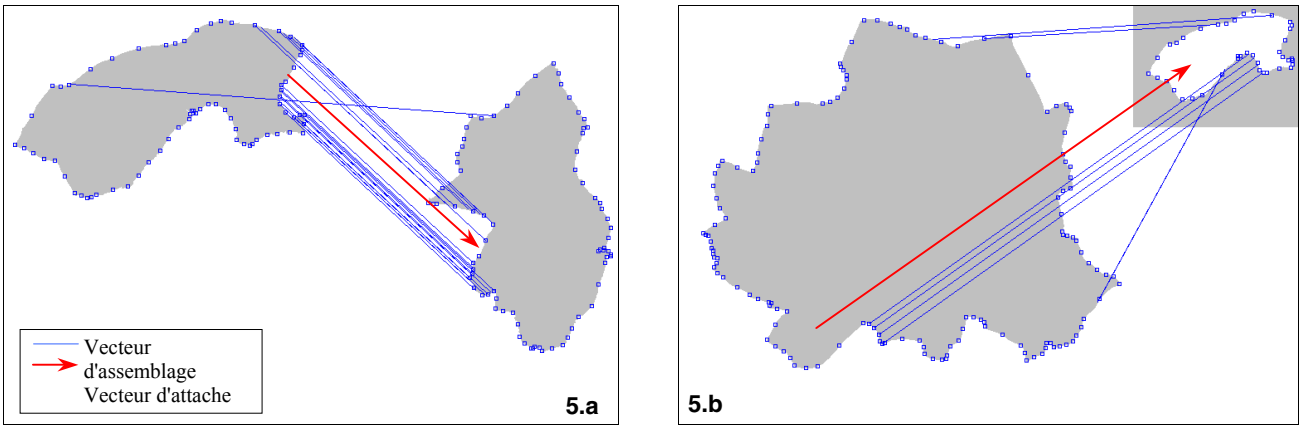


***figure B.2.5** : vecteurs d'assemblage et d'attache, 5.a entre pièces, 5.b entre pièce et commune*

Finalement, on ne conserve qu'un seul vecteur d'attache entre deux pièces et avec la commune (celui de meilleure confiance). On obtient une liste d'attaches possibles, entre pièces et avec la limite de commune BD CARTO, triée par confiance décroissante. On traduit cette liste sous forme d'équations d'attaches relatives (pièce/pièce) et absolues (pièce/commune), chaque équation étant valuée par sa mesure de confiance.

On obtient donc le système d'équations suivant :

$$x_i - x_j = DX_{ij}$$
$$y_i - y_j = DY_{ij}$$
$$x_i = XO_i$$
$$y_i = YO_i$$

(pour toute pièce i, j de coordonnées (x_i,y_i) et (x_j,y_j) avec i < j).

Principe de résolution du système

Supposons qu'on veuille placer trois pièces (A, B, C) dans un puzzle (figure B.2.6, page suivante).

Tant que la pièce C n'est pas encore placée, la pièce A peut se placer en p_1 ou p_2, mais on préférera la placer en p_1 car la longueur d'attache entre A et l'extérieur est plus grande qu'entre A et B (figure B.2.6a). Une fois C placée, on préfèrera placer A en p_2 (figure B.2.6b). En fait, lorsque le puzzle est entièrement résolu, toutes les pièces se touchent et la longueur d'attache est maximale (figure B.2.6c). En fait, notre problème peut être vu comme une maximisation des attaches entre les pièces.

Cela revient donc à minimiser le système d'équations || AX – B || ou A est la matrice du système d'équations d'attache, B le vecteur de mesures (DX_{ij}, Dy_{ij},…) et X de coordonnées que l'on cherche à trouver (x_i, y_i). Chaque ligne du système étant valuée par la confiance d'attache. La méthode utilisée est une méthode d'optimisation en norme L1 (moindres L1, voir [BARRODALE, ROBERTS 74]).

Dans notre exemple, cela revient à chercher le point P qui minimise :

$| Pp_1 | \times \bullet(A,Ext) + | Pp_2 | \times \bullet(A,B) + | Pp_2 | \times \bullet(A,C)$

si la mesure d'attache •(A,Ext) est inférieure à •(A,B) + •(A,C) la solution est $P = p_2$.

L'intérêt d'une telle méthode est son approche non combinatoire. De plus, contrairement à d'autres types de résolution de systèmes surdéterminés, la solution retenue est une des mesures (aux moindres carrés, la solution sera une solution moyenne alors qu'ici, on obtient un sous-ensemble des mesures de départ). Cette solution est de plus

relativement robuste à des erreurs de mesure (dans notre exemple, la faute d'accroche entre la forme A et la zone extérieure est rejetée).

En fait, en pratique, l'extraction des pièces n'étant pas parfaite, la mesure de confiance ne correspond pas exactement à une longueur d'attache, tout spécialement lorsque l'orientation des pièces n'est pas parfaite (ce qui est souvent le cas sur certaines feuilles du cadastre). Ceci introduit un certain nombre de fautes qui viennent perturber la résolution du système et nous ont conduit à introduire une méthode de rejet des fautes, basée sur une auto-évaluation du résultat du placement.

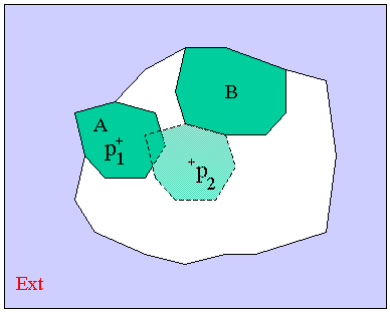


figure B.2.6a

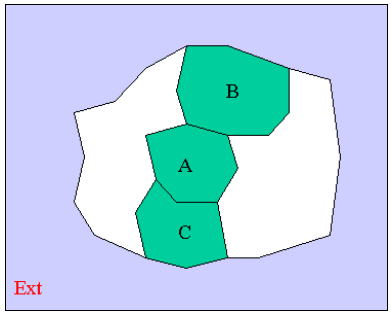


figure B.2.6b

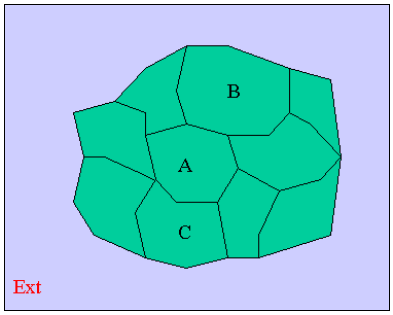


figure B.2.6c

figure B.2.6

Méthode de résolution

On peut affirmer que le puzzle est résolu lorsque la surface de la commune est entièrement recouverte par l'ensemble des sections cadastrales. On déduit de cette définition deux principes : d'une part, des contraintes de placement des pièces (basée sur le non-recouvrement des pièces entre elles) et, d'autre part, une mesure de réalisme afin d'auto-évaluer le résultat d'un placement.

Les contraintes de placement des pièces utilisées sont les suivantes :

- une pièce ne peut être placée dans le puzzle que si elle ne recouvre pas d'autre pièce à plus de *n* %, *n* étant le paramètre de recouvrement ;
- en cas de recouvrement, la pièce qui recouvre le plus d'autres pièces est éliminée ;
- en cas d'égalité, la pièce qui a le plus fort recouvrement total est éliminée ;
- en cas de recouvrement avec la limite BD CARTO, la pièce est éliminée.

Le réalisme d'un placement est défini par :

$$r = \left(\sum_{i} surf_i - 2. \sum_{i<j} over_{i,j} \right) / surf_{BDC}$$

avec : $surf_i$ = surface de la $i^{ème}$ pièce placée ;
$over_{i,j}$ = recouvrement entre la pièce i et j ;
$surf_{BDC}$ = surface de la commune BD CARTO.

Le réalisme est d'autant plus fort qu'il y a de pièces placées ($\sum_i surf_i$) et d'autant plus faible qu'il y a de recouvrement ($\sum_{i<j} over_{i,j}$). Au maximum, toute la surface de la commune est couverte sans recouvrement et le réalisme vaut 1.

La méthode consiste à introduire, une à une, les équations d'attache dans le système par confiance décroissante et à résoudre le système obtenu (au moindre L1). À chaque étape, on vérifie que les contraintes de placement sont respectées et l'on calcule le réalisme du positionnement résultant. Après avoir introduit toutes les équations, on retient l'étape qui a donné le meilleur réalisme.

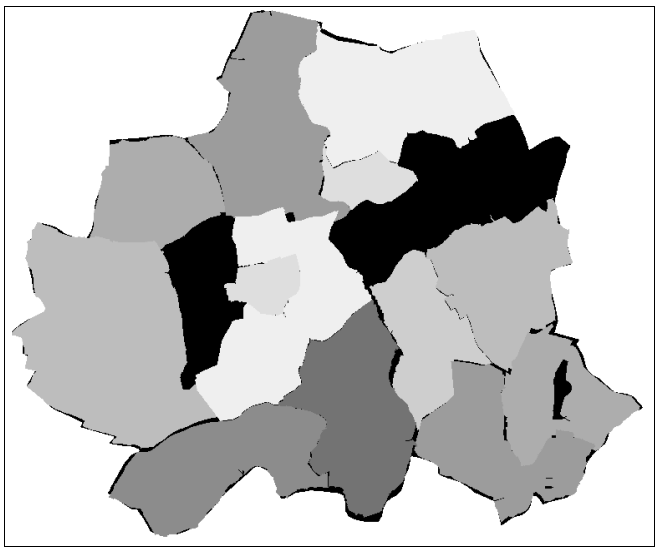
Elle correspond à un groupe d'équations. On supprime de ce groupe les équations ayant un fort résidu et l'on refait un placement aux moindres L1. On vérifie que ce nouveau placement ne détériore pas le réalisme, auquel cas, on garde l'ancien. Ceci permet de fixer la position d'un certain nombre de pièces. On retire alors du système les équations impliquant ces pièces deux à deux et l'on fixe leur position en introduisant une équation de position absolue, puis on réïtère l'opération en se limitant aux équations impliquant les pièces non encore placées jusqu'à avoir positionné toutes les pièces.

En cas d'échec

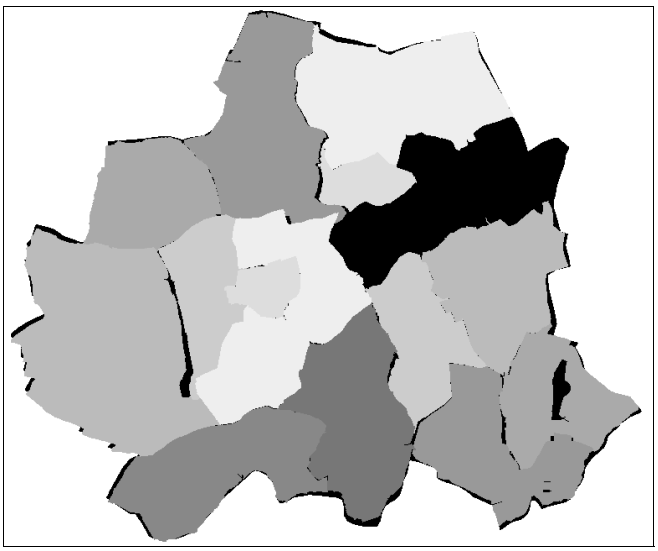
Il est possible que les itérations successives ne permettent pas de placer toutes les pièces. Dans ce cas, on réïtère l'opération en libérant les contraintes de placement (le paramètre de recouvrement). Une autre solution consiste à tester toutes les solutions possibles (données par les équations d'attache) pour les pièces non placées, la combinatoire étant réduite puisqu'on se limite aux pièces non placées. Au final, on garde la solution ayant le meilleur réalisme.

La méthode de détection de fautes permet de déceler les pièces qui ne « collent » pas dans le puzzle, car mal extraites ou mal orientées (surtout dans les zones ou le scannage est de mauvaise qualité).

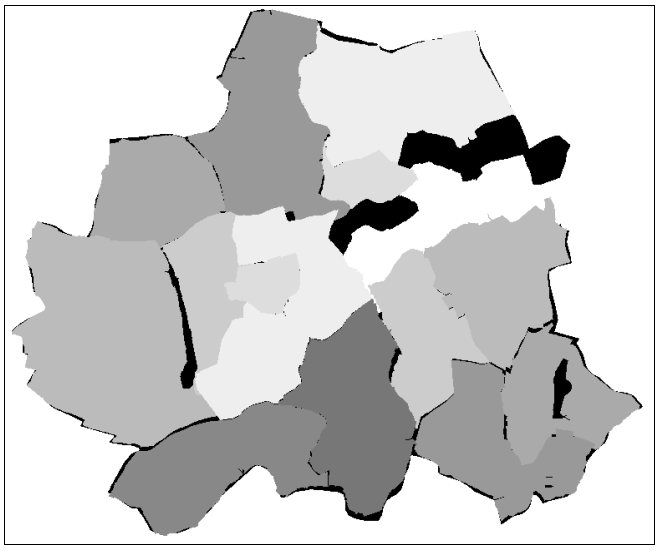
La rapidité du mode d'assemblage utilisé rend alors possible une retouche interactive du puzzle et un contrôle de la solution avec recalcul de l'assemblage global. En effet, un utilisateur peu facilement introduire une nouvelle position pour une pièce en ajoutant une équation d'attache absolue dans le système.



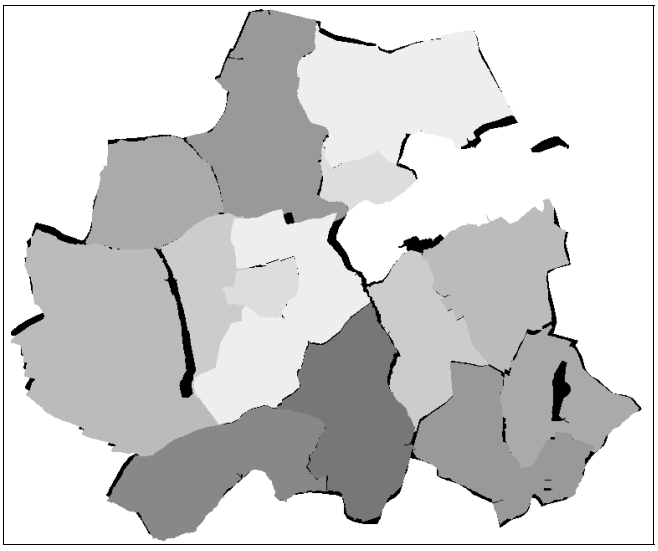
réalisme 69,78 % - 13 pièces placées



réalisme 83,05 % - 14 pièces placées
(meilleur réalisme : étape finale retenue)



réalisme 83,23 % - 15 pièces placées
(après relâchement des contraintes de recouvrement)



réalisme 85,78 % - 15 pièces placées
(après suppression des forts résidus)

figure B.2.7

Ajustement final

Il s'avère en fait que le positionnement obtenu n'est pas complètement satisfaisant. Ceci vient principalement d'erreurs sur la localisation de la flèche du Nord qui induisent une mauvaise orientation des pièces. On cherche donc dans un deuxième temps à optimiser le positionnement trouvé en libérant le paramètre d'orientation.

On utilise pour cela une approche mécanique de minimisation de potentiel autour de la solution initiale.

On affecte à chaque point de contour des pièces trouvées une force (f) de rappel qui va tendre à attirer les pièces voisines entre elles et sur les bords de la commune (figure B.2.8). On calcule, ainsi, l'accélération et le moment d'inertie de la pièce i.

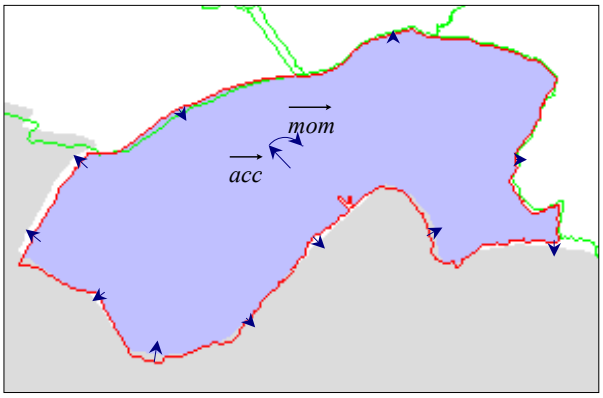


figure B.2.8 *: systhème de force sur une pièce*

Accélération = $\overrightarrow{acc_i} = \sum_{pt \in bord_i} \frac{\overrightarrow{f(pt)}}{masse_i}$.

Moment = $\overrightarrow{mom_i} = \sum_{pt \in bord_i} \frac{\overrightarrow{f(pt)} \wedge \overrightarrow{normale(pt)}}{inertie_i}$.

On intègre ces valeurs sur un intervalle de temps *dt* afin d'obtenir la vitesse instantanée et la vitesse angulaire de la pièce i à un instant t.

$$\overrightarrow{v_i(t)} = \overrightarrow{acc_i}.dt + \overrightarrow{v_i(t-dt)}.frottement$$

$$\overrightarrow{va_i(t)} = \overrightarrow{mom_i}.dt + \overrightarrow{va_i(t-dt)}.frottement\ .$$

On obtient ainsi un déplacement et un angle de rotation élémentaire sur cet intervalle.

$$\overrightarrow{dl_i(t)} = \overrightarrow{v_i(t)}.dt$$
$$\overrightarrow{dangle_i(t)} = \overrightarrow{va_i(t)}.dt\ .$$

On laisse évoluer le système jusqu'à ce qu'il atteigne un point d'équilibre (figure. B.2.9). On vérifie toujours au final que le procédé améliore le réalisme de positionnement.

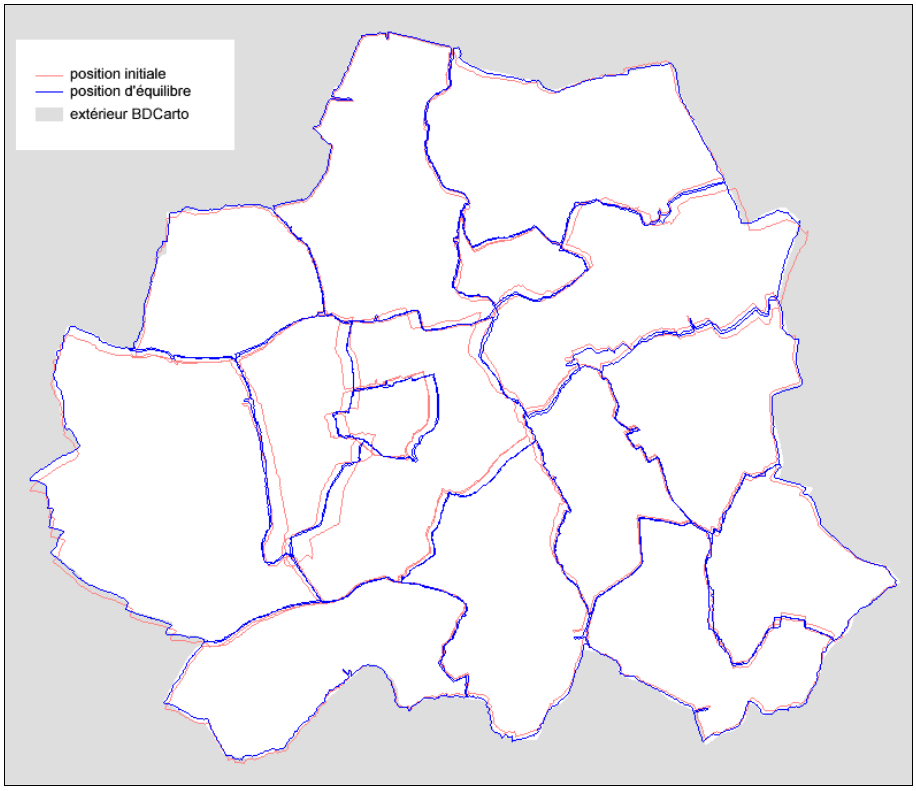


figure B.2.9
Évolution du système

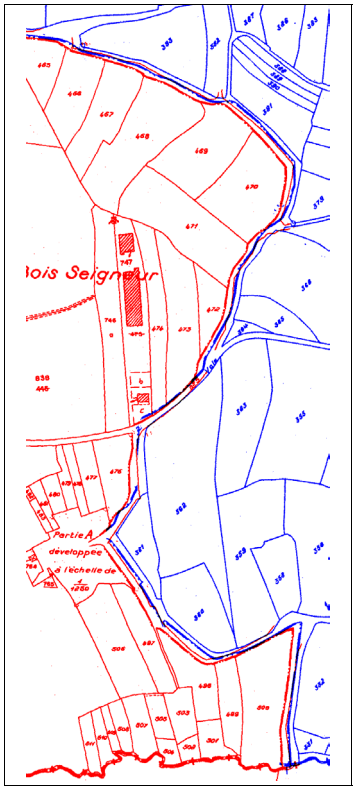


figure B.2.10
Assemblage de deux feuilles

Conclusion sur l'assemblage automatique

Ce procédé permet d'obtenir une position approximative des pièces entre elles (figure B.2.10), première étape dans la recherche du continuum. Il nous donne un tableau d'assemblage grossier des feuilles du cadastre qu'il nous restera à affiner par d'autres méthodes et une position approximative qui servira de base à un recalage plus précis sur ortho-photographie ou sur une base de donnée (BD TOPO).

Géoréférencement précis des planches cadastrales

La méthode d'assemblage des planches cadastrales d'une commune qui vient d'être décrite s'appuie sur la géométrie BD CARTO des limites de communes. Si l'on ajoute à la précision de la BD la précision même du processus d'assemblage, on obtient une précision absolue sur le positionnement final des planches de l'ordre de 20 mètres.

L'objectif final est la cohérence avec les autres éléments du RGE, c'est-à-dire la superposabilité avec la BD TOPO et la BD ORTHO.

Pour réaliser cet objectif, trois scénarii sont envisageables :

1- recalage des planches cadastrales sur ortho-photographie en s'appuyant :

- 1a. : sur les limites foncières ;
- 1b. : sur les axes de routes ;

2- recalage des axes de routes du cadastre sur ceux de la BD TOPO.

Approche générale

Quel que soit le scénario retenu, les limites foncières ou les axes de routes doivent être reconnus dans les planches cadastrales. En outre, dans le scénario (1b) il est également nécessaire de reconnaître le réseau routier sur la photographie. Les limites parcellaires sont directement visibles sur le cadastre comme sur l'image, alors que les axes routiers doivent être inférés. En automatique, le scénario (1a) est donc le plus facile et le plus sûr à conduire, les autres impliquant l'utilisation de méthodes d'extraction supplémentaires (axes routiers sur cadastre et/ou image), avec tout ce que cela comporte comme risques d'erreur supplémentaires.

Le scénario qui a été retenu est donc le recalage des plans cadastraux sur ortho-photographie, en s'appuyant sur les limites de parcelles. Nous décrivons ici les méthodes qui ont été mises au point pour son développement.

Le principe général de recalage est le suivant :

- extraction des limites parcellaires sur le plan cadastral numérisé. Ces limites sont obtenues sous forme polygonale et décomposées en une collection de segments. On appelle *S = {Si}*, l'ensemble de segments obtenus ;
- pour chacun des segments *Si*, on recherche un ensemble de positions possibles sur l'image, autour de la position initiale approchée et dans une tolérance de déplacement donnée par la précision du positionnement initial. Les positions possibles sont retenues sur un critère d'adaptation sur les contours de l'image, i.e. les lignes de fort contraste. On obtient ainsi pour chaque *Si*, un ensemble *Hij* d'homologues possibles sur l'image ;
- on considère une classe *T* de transformations pour l'adaptation du plan sur l'image. Dans notre cas, nous utilisons des transformations polynomiales (2-D) de degré donné. L'objectif est alors de trouver une transformation qui amène le plus de segments en coïncidence avec un de leurs homologues. Il s'agit d'un problème fortement combinatoire et très bruité : au plus un homologue par segment est juste, les limites fiscales ne correspondent pas toujours à des limites matérialisées sur le terrain, et quand c'est le cas, il n'y a pas toujours coïncidence géométrique, etc. Cependant, on espère qu'il existe un recoupement suffisant entre les deux parcellaires pour que la solution se dégage assez nettement du lot des possibles. Nous proposons une méthode de recherche de cette solution qui s'appuie sur une résolution de système surdéterminé en norme L1 et deux stratégies complémentaires d'élagage de faux appariements et d'extension d'appariements justes.

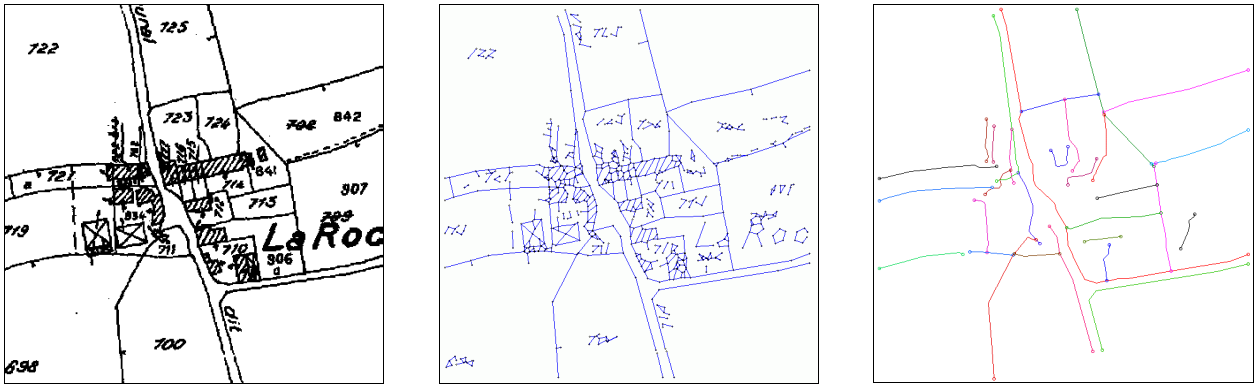
Nous décrivons maintenant chaque étape successivement.

Extraction des limites parcellaires sur le plan cadastral numérisé

Cette partie a pour objectif d'extraire, sous forme vectorielle, une grande majorité de limites de parcelles du plan cadastral, tout en filtrant les autres informations perturbatrices, essentiellement écritures et bâti. Le principe d'extraction s'appuie sur l'idée que les limites de parcelles forment des alignements de longueur significative.

Le plan cadastral scanné commence par être vectorisé par l'algorithme de Marc Pierrot Deseilligny [DESEILLIGNY 94] avec un paramètre de généralisation des polygonales assez fort. On voit en particulier en figure B.2.11b) que les écritures sont fortement simplifiées. On recherche alors les alignements dans le graphe obtenu. Cette recherche se fait par chaînage itéré des couples d'arêtes qui minimisent un critère d'alignement, donné par le rapport entre la distance à la corde et la longueur de la corde. Un angle maximum de virage est également introduit (60°).

Finalement, on ne retient que les chaînes de longueur suffisante (20 m). On peut voir en figure B.2.11 que les écritures et les bâtiments ne produisent pas de chaînes assez longues alors que les limites parcellaires significatives sont toutes extraites.



(a) plan cadastral scanné (b) vectorisation fortement généralisée (c) alignements de plus de 20m extraits

***figure B.2.11** : extraction de limites de parcelles du plan cadastral*

Appariement des limites de parcelles avec l'image

On dispose, à ce point, d'une collection de segments *{Si}i = 1..n*, ayant une position approchée dans l'image, qui correspondent à la décomposition en éléments linéaires des limites parcellaires extraites. Nous filtrons les segments vraiment trop courts (< 3 m).

Nous recherchons alors autour de chaque segment un ensemble de positions possibles dans l'image. Pour cela, l'ensemble des positions voisines est balayé systématiquement (à la résolution de l'image), dans une plage donnée par la précision du recalage initial. Typiquement, à la suite d'un assemblage automatique sur une commune, l'angle est très contraint (10° au maximum sur les bords) et la distance ne dépasse pas 30 mètres.

Le critère d'adaptation est le taux d'adéquation avec les contours de l'image. Nous calculons le gradient de l'image par une méthode de Canny-Deriche. Tous les maxima locaux du gradient sont alors retenus comme points de contour. Les vecteurs de gradient sont normalisés. Nous obtenons un champs vectoriel *g*, où *||g(i,j)||* vaut 1 ou 0 selon la présence ou non d'un contour image et la direction de *g(i,j)* donne l'orientation de la normale au contours. Pour un segment *S* à une position donnée dans l'image, nous calculons alors le score :

$$Q(S) = \frac{1}{n}\sum_{p\in S}\left|\det\left(g(p),d\right)\right| - \beta\left|g(p).d\right| = \frac{1}{n}\sum_{p\in S}\left|\sin\left(g(p),d\right)\right| - \beta\left|\cos\left(g(p),d\right)\right|$$

où la somme porte sur tous les points du segment, qui sont en nombre *n*, *d* est le vecteur de direction du segment et b est un paramètre. Le déterminant de l'angle *(g,d)* est d'autant plus grand que *d* et *g* sont orthogonaux, à l'inverse leur produit scalaire décroit avec leur angle. Leur somme s'annule pour un angle précis. C'est cet angle qui règle le paramètre β : si α est cet angle, alors β doit être choisi par :

$$\beta = 1/\sqrt{\cos^2\alpha} - 1$$

En résumé, les points de contours contribuent positivement à la qualité d'une position tant que leur angle avec la normale au segment est inférieur à α, au-delà, ils jouent négativement. Cette qualité d'adaptation est calculée pour toutes les positions homologues envisagées dans l'image.

Nous fixons alors un seuil de qualité absolue, *Qabs*, et un seuil de qualité relative *Qrel*. Nous retenons finalement toutes les positions de qualité supérieure à *Qabs* et de qualité relative à celle de la meilleure position supérieure à *Qrel*. Dans la pratique, nous utilisons α = 20°, *Qabs* = 0,2 et *Qrel* = 0,5. L'appariement de segments par cette technique est illustré figure B.2.12. Notons que cet appariement ne dépend que de la géométrie des contours de l'image et est indépendant de sa dynamique.

figure B.2.12

Recalage de segments sur image. Jaune : le segment d'origine. Noir : les positions candidates trouvées. L'image aux traits représente les maxima locaux du gradient de l'image. La direction locale du gradient, qui est le critère le plus important pour l'adaptation, n'est malheureusement pas représentée.

Recalage global de la planche cadastrale

À ce point, nous disposons d'un ensemble de *n* segments *Si* ainsi que d'une collection *Hij* d'homologues possibles sur l'image. Évidemment, les segments pour lesquels on n'a pas trouvé d'homologue sont éliminés de la liste. L'objectif du recalage global est alors de faire coïncider la plus grande longueur de limites avec un homologue, via une transformation géométrique donnée.

On ajoute à la liste des homologues possibles de chaque segment un homologue particulier, appelé homologue nul, qui correspond à ne pas apparier le segment. Un *Appariement* des segments est alors un vecteur de longueur n qui désigne pour chaque segment *Si* l'homologue qui lui est affecté.

Nous utilisons une famille de transformations *T* régie par un nombre *p* de paramètres. Nous considérons ici les transformations polynomiales du plan. Une transformation de degré 1 (affine) a donc six paramètres, de degré 2, douze paramètres, etc.

On se dote d'une procédure *M(A)* qui, pour un appariement donné des segments, calcule les paramètres de la transformation qui fait coïncider « au mieux » les segments avec les homologues choisis. Cette procédure sera explicitée par la suite.

Notons *d(M,S)* la distance d'un point *M* à un segment *S*, définie par la distance du point à la droite porteuse du segment. La distance *d([A,B],S)* d'un segment *[A,B]* à un autre est alors définie comme le maximum de *d(A,S)* et de *d(B,S)*.

Nous introduisons un critère de validation des appariements, qui s'appuie sur un paramètre *dV,* appelé *Distance de Validation*. Pour une transformation *T*, on dira qu'un appariement entre un segment *S* et son homologue *H* est validé quand *d(T(S),H) < dV*. Les segments non appariés (d'homologue nul) ne sont pas validés.

La *Qualité* d'un couple *(Appariement,Transformation)* est alors définie comme la somme des longueurs des segments dont l'appariement est validé.

Avec ces ingrédients, le problème de recalage global se résume à celui de trouver un Appariement *A* de l'ensemble des segments, tel que si *M(A)* est la transformation « optimale » pour cet appariement, la qualité *Q(A,M(A))* est maximale. Cette formulation correspond bien à l'objectif de mettre en coïncidence la plus grande longueur de limites de parcelles avec des limites image.

À première vue, le problème est fortement combinatoire : si chaque segment a *h* homologues possibles, l'espace de recherche est de taille h^n. Pour fixer les idées, dans une planche cadastrale moyenne, on extrait plusieurs milliers de segments et chacun a en moyenne trois homologues possibles. Dans un premier temps, nous exposons la méthode *M(A)* de recherche d'une transformation adaptée pour un appariement donné. Nous expliquons ensuite la technique de recherche d'appariement que nous avons retenue.

Estimateur L1 d'une transformation polynomiale

Pour adapter un jeu de segments sur un jeu d'homologues, nous optimisons un système où les homologues jouent le rôle d'attaches pour les segments. Nous posons deux équations d'attache par segment, une pour chacune de ses extrémités, ce qui donne pour un segment *[A,B]* d'homologue *H* :

d(T(A),H) = 0 et *d(T(B),H) = 0*.

Si *T* est une transformation polynomiale, les équations obtenues sont linéaires en fonction des inconnues, i.e. les coefficients du polynôme recherché. En outre, nous pondérons chaque équation par la longueur du segment qu'elle concerne.

Ce système linéaire surdéterminé est alors optimisé en norme L1 [BARRUMDALE, ROBERTS 74], ce qui revient à chercher la solution qui minimise :

$$\sum_{[A,B]\in S} d(A,B).\left[d\left(T(A),H\right)+d\left(T(B),H\right)\right]$$

Ce qui s'interprète comme deux fois la surface comprise entre les segments et leurs homologues. La solution trouvée par ce principe est très robuste au bruit : on montre qu'elle résiste strictement sans biais jusqu'à 50 % d'erreur dans le choix des homologues.

Recherche efficace d'une solution au problème d'appariement

La méthode *ad hoc* pour rechercher une solution consiste à tirer aléatoirement un certain nombre d'appariements, résoudre les systèmes, et retenir l'appariement et la transformation associée qui maximisent la qualité. Telle quelle, cette procédure nécessite un nombre énorme d'essais pour garantir une probabilité suffisante d'obtenir une solution satisfaisante.

Remarquons alors plusieurs propriétés essentielles du problème.

Le système est très sur-déterminé. Il suffit de très peu de segments pour contraindre un polynôme de degré raisonnable (trois segments bien configurés déterminent une affinité).

Une transformation donnée (éventuellement calculée sur peu de segments) fixe l'ensemble des positions des segments. Il est donc possible, à partir de cette nouvelle position approximative, de compléter un appariement partiel en assignant à tous les segments non appariés leur plus proche homologue. Nous appelons ce procédé une *extension d'appariement* (au plus proche voisin). Il est évidemment plus sûr de limiter les extensions à une distance maximale, i.e. n'assigner un nouvel homologue que s'il est à distance raisonnable *dE* du segment.

Par ailleurs, l'optimisation en norme L1 a beau être robuste, à partir d'un certain taux d'erreur, les fautes en biaisent le résultat. Une procédure d'*élagage de fautes* améliore grandement le résultat dans notre cas où le bruit peut être très important. Nous utilisons donc une procédure d'élagage contrôlée par un paramètre de distance *dF*.

Ces deux procédures, élagage et extension, sont complémentaires. Quand un système est élagué, un certain nombre de segments sont libérés. En faisant suivre une extension limitée, un certain nombre de segments libres sont ré-appariés vers un homologue plus satisfaisant que le précédent. La composition d'un élagage et d'une extension revient donc à modifier un appariement initial en s'appuyant sur la géométrie.

Ce principe de raffinement, allié à la robustesse de l'estimateur L1, produit une méthode de recherche de solution efficace, qui s'articule en :

$$\sum_{[A,B]\in S} d(A,B).\left[d\left(T(A),H\right)+d\left(T(B),H\right)\right]$$

Répéter les opérations :

- tirer aléatoirement un appariement - résoudre le système ;
- élaguer l'appariement à *dF* - résoudre ;
- étendre l'appariement à *dE* - résoudre ;
- étendre à *dV* et qualifier le système : la solution est retenue: si sa qualité est meilleure que celle des essais précédents ;
- arrêter si aucune meilleure solution n'a été trouvée depuis *K* essais.

On peut imaginer de nombreuses variantes autour de ce schéma. Par exemple, mixer la technique avec un algorithme génétique : les meilleures solutions trouvées précédemment sont mémorisées et les nouvelles initialisations ne sont pas tirés purement aléatoirement mais proviennent de « mutations » (bruitages aléatoires) ou « croisements » (mélanges aléatoires) des solutions mémorisées. Même sans ce raffinement, une solution satisfaisante est trouvée en, tout au plus quelques milliers d'essais, ce qui représente quelques minutes de calcul.

Résultats et conclusion sur le recalage image

La figure B.2.13b montre le résultat de recalage global par une transformation affine de la planche initialisée à la position représentée en B.2.13a. L'ensemble des opérations de recalage pour cette planche est résumé par le tableau B.2.1. La figure B.2.14 présente des détails de superposition après recalage.

Les différences de contenu entre cadastre et image (absence complète de limite image) ne posent pas de problème à l'algorithme de recalage. Les problèmes essentiels apparaissent en cas de déformations géométriques locales qui ne sont pas modélisables par des transformations globales, ou d'ambiguïté entre différentes limites images parallèles (voir figure B.2.14 (c).

Par ailleurs, les problèmes de recalage surviennent le plus fréquemment au niveau de l'appariement des limites de routes, pour lesquelles l'emprise fiscale ne correspond pas à l'emprise physique. Ce problème est d'autant plus pénalisant que les routes forment les accroches les plus structurantes et les plus pérennes. Nous projetons donc d'évaluer l'introduction des axes de routes dans le processus de recalage (détection sur plans cadastraux et axes BD TOPO).

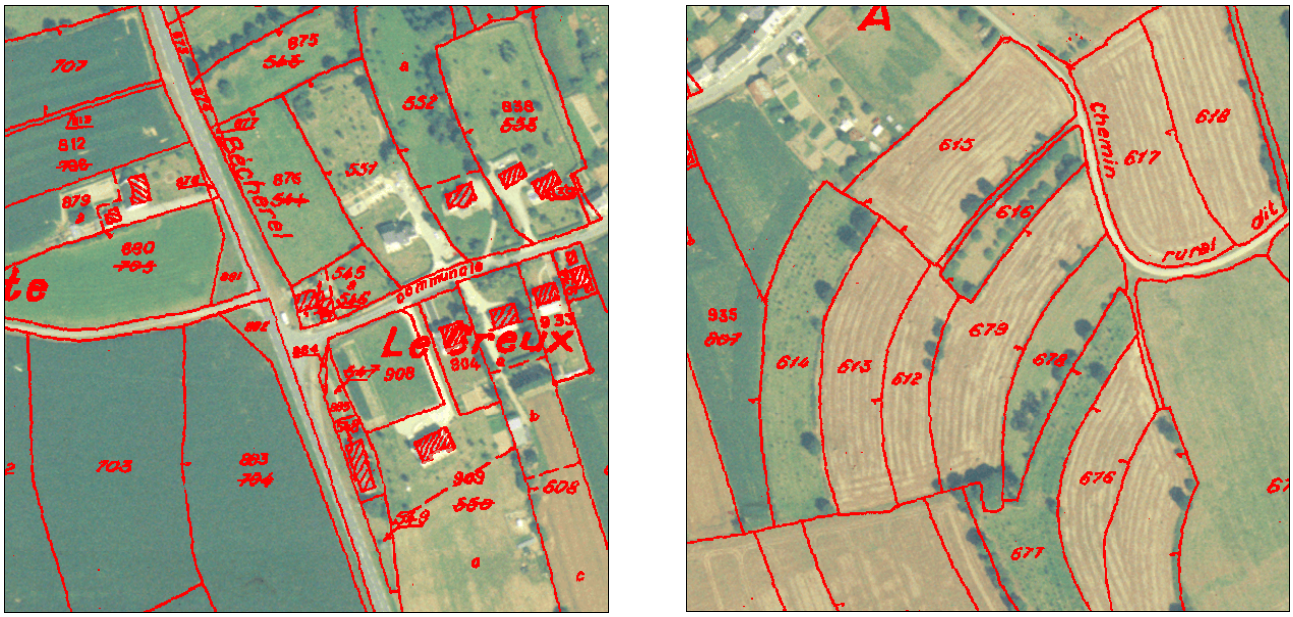
***tableau B.2.1** : étapes du processus de recalage de la planche 10 de Pleslin-Trigavou*

Étape	Paramètres	Nombre d'objets	Longueur	Proportion
Vectorisation	Généralisation	13 042 arêtes/11 490 nœuds	66 470 m	100 %
Chaînage	Déviation maximale 60°	5 427 chaînes	"	"
Segments retenus	Long. min chaîne 20 m Long. min segment 3 m	3 303 segments	42 377 m	64 %
Appariement image des segments	Dist. max 30 m Angle max 10°	2 496 segments appariés 2,9 homologues en moyenne	28 006 m	42 %
Optimisation globale	DV = 2 m, dE = 4 m, dP = 6 m	825 appariements validés	9 102 m	14 %

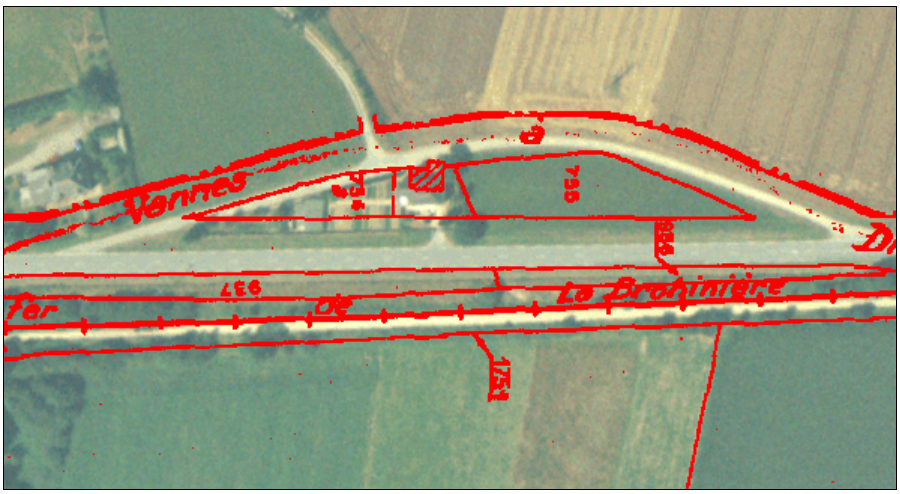
(a) résultat après assemblage

(b) résultat après recalage image

figure B.2.13 *: superposition des résultats sur ortho-photographie*



(a) (b)



(c)

figure B.2.14 *: détails de superposition du cadastre sur l'image*

(a) et (b) : appariement satisfaisant malgré les différences géométriques locales. La position des bâtiments, qui ne participent pas au recalage, est un bon critère de contrôle.

(c) montre un échec de recalage (3 à 4 m de translation vers le haut) dû à l'ambiguïté entre les différentes lignes parallèles.

Conclusion

Les algorithmes présentés permettent de géoréférencer complètement automatiquement le cadastre scanné en s'appuyant sur la couche administrative de la BD CARTO et sur la BD ORTHO de l'IGN.

En outre les méthodes utilisées fonctionnent assez rapidement. Les temps de calcul les plus importants résident dans les phases préliminaires, facilement dissociables de la résolution. Les parties résolution proprement dites, tant du problème de puzzle que du recalage image, peuvent alors facilement intégrer des phases de contrôle et de corrections interactives.

Des tests sont en cours, sur un échantillon significatif de planches cadastrales, afin d'évaluer la fiabilité et la précision de la méthode. Parallèlement, le projet BDParcellaire évalue l'apport de ces procédures automatiques dans la réalisation d'une maquette de cadastre géoréférencé sur la commune de Pleslin-Trigavou.

Références

Opérations morphologiques, vectorisation et extraction des pièces

[CHASSERY, MONTANVERT 91] J.-M. Chassery & A. Montanvert : *Géométrie discrète en Analyse d'Images*, Hermes éd. Paris (F), 1991

[DESEILLIGNY 94] M. Pierrot Deseilligny : *Lecture automatique de Cartes*, in PhD dissertation, Université Paris-5, René Descartes, vol 2, Paris, 1994.

[DESEILLIGNY et al 98] M. Pierrot Deseilligny, G. Stamon and C.Y. Suen : *Veinerization : A New Shape Description for Flexible Skeletonization*, in IEEE Transaction in Pattern Analysis Intelligence, vol 2, n° 5, May 1998, pp. 505-521, 1998.

[FRISCHKNECHT et al 98] S. Frischknecht, E. Kanani and A. Carosio : *A raster-based approach for the automatic interpretation of topographic maps,* IAPRS, vol. 32, Part 3/1, pp. 523-530, Columbus (USA), 1998.

[PETER, WEIBEL 99] B. Peter and R. Weibel : *Using Vector and Raster-Based Techniques in Categorical Map Generalization*, 3th ICA Workshop on Progress in Automated Map Generalization, Ottawa (CDN), August 1999.

Optimisation en norme L1

[BARRODALE, ROBERTS 74] I. Barrodale and F. D. Roberts : *Algorithm 478 : Solution of an Overdetermined System of Equations in the L1 norm*, CACM 17, pp. 319-320, 1974.

Résolution de puzzles

[SCARLATOS 99] L.L. Scarlatos : *Puzzle Piece Topology: Detecting Arrangements in Smart Object Interfaces*, in Proceedings of the 7th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Interactive Digital Media'99, pp. 456-462, 1999.

[RATNER, WARMUTH 86] D. Ratner and M. Warmuth : *Finding a shortest solution for the NxN extension of the 15-puzzle is intractable*, in Proceedings of AAAI 1986, Philadelphia, Pa (USA), 1986.

[DROGOUL, DUBREUIL 93] A. Drogoul and C. Dubreuil : *A distributed approach to n-puzzle solving,* in Proceedings of the Distributed Artificial Intelligence Workshop, 1993.

[GU et al 99] Q.P. Gu, S. Peng and H. Sudborough : *A 2-approximation algorithm for genome rearrangements by reversals and transpositions*, in Theor. Comput. Science 210, pp. 327-339, 1999.

[LEWIS, GILLETT 91] H. Lewis and W. Gillett : *DNA Mapping Algorithms : Clone Sequencing*, WUCS-91-34, October 1991.

[PARDALOS et al 95] P. Pardalos, L. Pitsoulis, T. Mavridou and M. Resende : *Parallel search for combinatorial optimization : Genetic algorithms, simulated annealing and GRASP*, in Computer Science, 980, pp. 317-331, 1995.

B.3 Réalisation et mise en œuvre d'une caméra numérique multi-canaux

Christian Thom et Jean-Philippe Souchon

Contexte

Depuis 1991, le laboratoire OEMI développe des caméras numériques matricielles aéroportées. Les deux derniers prototypes disponibles pour voler en pré-production étaient : une caméra 4k x 4k panchromatique et une caméra 3k x 2k couleur. Cette dernière utilisait un CCD couleur, du même type que ceux utilisés dans les caméras grand public, c'est-à-dire une mosaïque de pixels de couleur rouge, verte ou bleue. Lors de son utilisation pour la mission Ile de France à l'été 1999, cette caméra a montré ses limites pour l'acquisition d'images au pixel sol de l'ordre de 50 centimètres à un mètre. En effet, les artefacts colorés dus à la structure du capteur sont très nombreux à cette résolution.

Face à ce constat, il nous est apparu que la meilleure solution pour l'acquisition d'images numériques couleur haute résolution de qualité était de synchroniser plusieurs caméras noir & blanc équipées de filtres en adéquation avec le canal spectral désiré. Un vol de ce prototype version RVB avait été fixé par avance sur le Bassin d'Arcachon pour compléter une mission réalisée, sur le même site, en octobre 1999, dans le canal proche infrarouge (IR). De plus, la synchronisation de plusieurs caméras peut aussi être utilisée pour obtenir un instrument à double fauchée, en inclinant à droite et à gauche, les axes de deux caméras couplées. Ceci a pour résultat un important gain sur les coûts de vol, car le nombre d'axes est divisé par deux.

***figure B.3.1** : position des trois têtes de caméras sur leur support*

Description de la caméra « vraie couleur »

Lorsque nous avons lancé la réalisation de cette nouvelle caméra, nous disposions au laboratoire de deux formats de capteurs noir et blanc : 4 096 x 4 096 pixels (au nombre de deux dont un dégradé) et 3 072 x 2 048 pixels (au nombre de trois, dont deux dégradés). Les têtes de caméras destinées à porter des filtres : rouge, vert et bleu, ont donc été équipées de ces trois derniers CCD pour le prototype. À terme, ils seront remplacés par des capteurs 4 096 x 4 096 pixels dotés d'un dispositif anti-éblouissement et renforcés dans la gamme de longueur d'onde du bleu (réf. : KAF-16801LE).

Montage mécanique des têtes de caméras

La figure B.3.1 ci-dessus donne un aperçu de la disposition des caméras sur leur support. Les montures permettant de les fixer ainsi autorisent un réglage de la direction de visée assez fin pour permettre un alignement des différents plans meilleur que dix pixels. Il ne s'agit pas ici d'aligner chaque pixel de chaque plan, ce qui sera fait par logiciel sur les images, mais de perdre ainsi moins de lignes et de colonnes lors du recalage des trois plans. Lors d'un premier vol d'essai, nous nous sommes contentés de fixer les caméras sur leur support avec ces montures insuffisamment rigides et de plus mettant les caméras en porte-à-faux : nous avons observé lors du recalage des images, des variations d'orientation relative des caméras laissant supposer que des vibrations perturbaient le système.

Nous avons donc complété cette fixation par des équerres solidarisant les caméras entre elles comme le montre la figure B.3.2, sur laquelle l'équerre visible a été teintée en magenta pour une meilleure lisibilité. On pourra trouver plus loin (figures B.3.9 et B.3.10, pages 50 et 51), une illustration de l'amélioration des performances obtenues. Malgré une amélioration notable, la stabilité nous semble encore insuffisante pour obtenir une superposition correcte sans mesure individuelle pour chaque triplet d'image. C'est de toute façon, un surcroît de temps de traitement négligeable par rapport au reste.

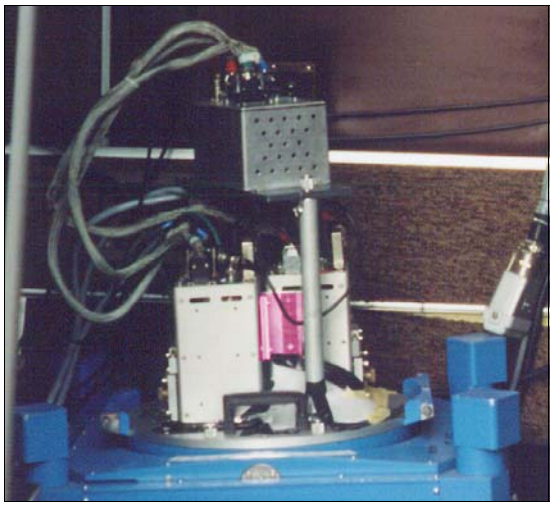


figure B.3.2 : *têtes de caméras sur plate-forme Zeiss, reliées par des équerres*

Caractéristiques spectrales des têtes de caméras

Les capteurs KAF-6300 sont sensibles du bleu au proche IR comme le montre la courbe la plus fine figure B.3.3, ci-dessous. Pour sélectionner pour chaque caméra le domaine spectral correspondant à la couleur assignée à celle-ci, il est nécessaire de placer devant l'objectif un filtre rejetant les longueurs d'onde indésirables. Ces filtres colorés nous ont été fabriqués par la société Z/I Imaging dans le cadre de notre collaboration pour la réalisation de caméras aériennes numériques. On pourra trouver leur courbe de réponse figure B.3.4 (page suivante). En considérant que la fenêtre spectrale du proche IR commence aux alentours de 700 nm, il faut pour l'acquisition du plan rouge ajouter un filtre coupant les longueurs d'onde sortant du domaine du visible (cf. caractéristique sur la figure B.3.5, page suivante).

L'extrait d'image figure B.3.6 (page suivante) montre le résultat de la fusion des trois plans : rouge, vert et bleu, lorsqu'on oublie d'ajouter ce filtre. La végétation a un pic d'émission à partir de 700 nm environ, qui donne cet aspect rougeâtre. De plus, l'image est moins nette, les objectifs utilisés n'étant apochromatiques et donc ne garantissant une bonne focalisation que pour les rayonnements visibles. La combinaison de la réponse des filtres et de la sensibilité du capteur résulte en une sensibilité variable de chaque caméra. Pour avoir accès à une dynamique convenable dans chaque plan, on utilisera donc différents temps de pose pour égaliser grossièrement les niveaux. C'est là un des avantages de ce type d'instrument, par rapport à d'autres comme notre précédente caméra couleur basée sur un capteur couleur, ou une caméra à barrette. Les rapports entre les temps de pose des différents canaux sont déterminés en laboratoire. Durant la mission aérienne, l'opérateur ne peut jouer que sur un temps d'exposition global. La recomposition finale de la couleur ne sera faite que durant le post-traitement.

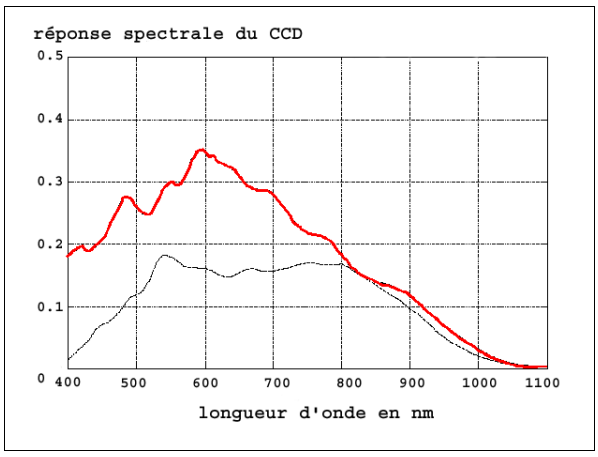


figure B.3.3

Réponse spectrale des pixels du CCD KAF-6300 (en noir) et du KAF-16801LE (en rouge).

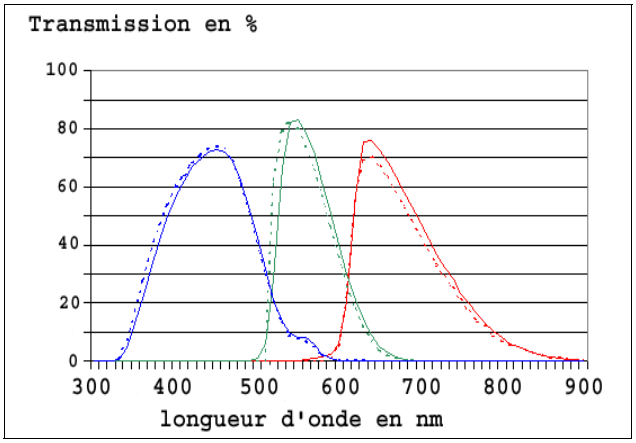


figure B.3.4

Transmission spectrale mesurée (trait continu) et calculée (trait pointillé) des filtres R, V et B placés.

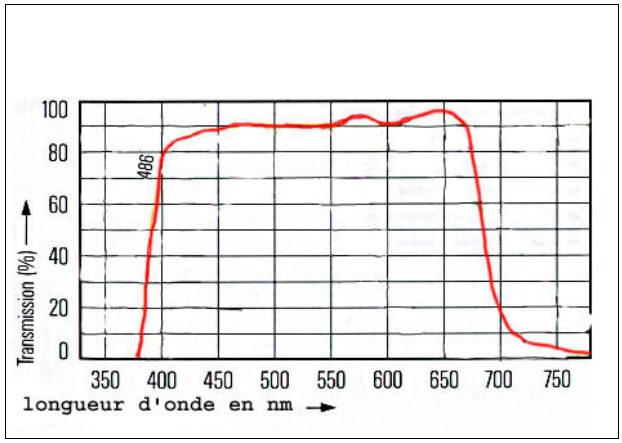


figure B.3.5

Transmission spectrale du filtre IR utilisé pour le canal rouge.

figure B.3.6

Extrait d'image acquise sans le filtre décrit en figure B.3.5.

figure B.3.7

Extrait d'image acquise avec le filtre décrit en figure B.3.5.

L'informatique d'acquisition

Le système a été pensé comme l'union de plusieurs systèmes identiques à ceux développés au laboratoire OEMI jusqu'ici. De même que trois têtes de caméras sont juxtaposées sur la trappe de prise de vue, trois racks informatiques d'acquisition sont empilés dans un caisson amortisseur.

Pour que la superposition des plans colorés puisse se faire sans connaissance du relief de la scène, il est impératif que les vues soient prises du même point. Ceci, dans un avion volant à près de cent mètres par seconde, est assuré par une synchronisation très fine des caméras. Par rapport aux versions antérieures, les caméras ont donc été munies d'une prise BNC supplémentaire. On peut ainsi les relier entre elles à l'aide d'un câble coaxial afin d'assurer cette synchronisation au plus bas niveau. Une caméra maître envoie un top aux caméras esclaves qui sont en attente pour le déclenchement de leur prise de vue. Cet ensemble est désigné par le terme instrument dans les logiciels permettant d'utiliser les caméras.

Chaque tête de caméra est associée à son système d'acquisition qui est relié aux autres *via* le réseau Éthernet. Un des racks commande les autres pour la gestion de l'instrument (choix de la position du diaphragme, réglage des temps de pose, envoi de l'ordre de prise de vue), l'affichage des images, et pour la gestion du déroulement d'une mission (choix de la cadence de prise de vues, sauvegarde sur disques des images acquises,…). En fait, tout est prévu pour pouvoir déporter toutes les interfaces avec l'opérateur sur une machine distincte de la caméra mais reliée au réseau, un PC portable par exemple, à l'exception des tâches « temps réel » critiques. Ceci donnera plus de souplesse pour l'installation dans l'avion.

Les images de chaque plan sont donc sauvegardées sur des disques durs amovibles différents. Comme nous l'avons dit plus haut, les plans ne sont fusionnés en une image couleur que lors de la phase du post-traitement. Le contrôle visuel des images en temps réel dans l'avion ne peut donc se faire que par plans séparés. C'est en général suffisant, car il ne sert qu'à juger de la qualité de la météo, et à régler le temps d'exposition.

figure B.3.8 *: les trois caméras (en arrière-plan) et leur électronique d'acquisition*

Post-traitement des données

Les images brutes sur douze bits de chaque canal sont tout d'abord passées sur huit bits. Durant cette phase du traitement, on effectue aussi la correction de champ uniforme (assombrissement dû à l'optique, et variations de sensibilité des pixels), la soustraction du niveau de noir, et l'interpolation des défauts des capteurs. L'équilibrage des couleurs se fait aussi durant cette phase. On peut de plus, si nécessaire, corriger un effet de voile atmosphérique. Ensuite, ces plans colorés sont superposés pour obtenir une image colorée bien registrée. On sait que des images obtenues d'un même point de vue peuvent se superposer grâce à une homographie. Ceci n'est vrai que si la distorsion due à l'optique est d'abord corrigée. Dans notre cas, cela n'est pas nécessaire, car les caméras visent toutes dans la même direction, c'est-à-dire que des pixels homologues se retrouvent déplacés par la distorsion de décalages identiques, car toutes les optiques sont identiques.

Notre traitement superpose donc les plans en rééchantillonnant les plans rouge et bleu pour les aligner sur le plan vert. Les données d'étalonnage géométrique nécessaires sont donc celles de la caméra « verte ». Pour connaître les homographies, on mesure par corrélation les vecteurs-déplacement de vingt-cinq points régulièrement espacés et l'on détermine la meilleure homographie par moindres carrés. En pratique, on constate que ce système est très performant, même sur des zones faiblement contrastées. La précision de recalage est difficilement évaluable, mais une indication en est la valeur des résidus dans le processus de moindres carrés. On trouve couramment des valeurs de l'ordre du dixième de pixel.

Un des sous-produits de cette opération est la mesure de la stabilité de la monture des caméras. On trouvera, figures B.3.9 et B.3.10, ci-dessous, les variations le long d'une bande de la partie translation en x et y de l'homographie, il s'agit en fait de la translation au centre de l'image. Dans un cas, la monture simple a été utilisée, et dans l'autre, elle a été renforcée par des équerres solidarisant les caméras entre elles.

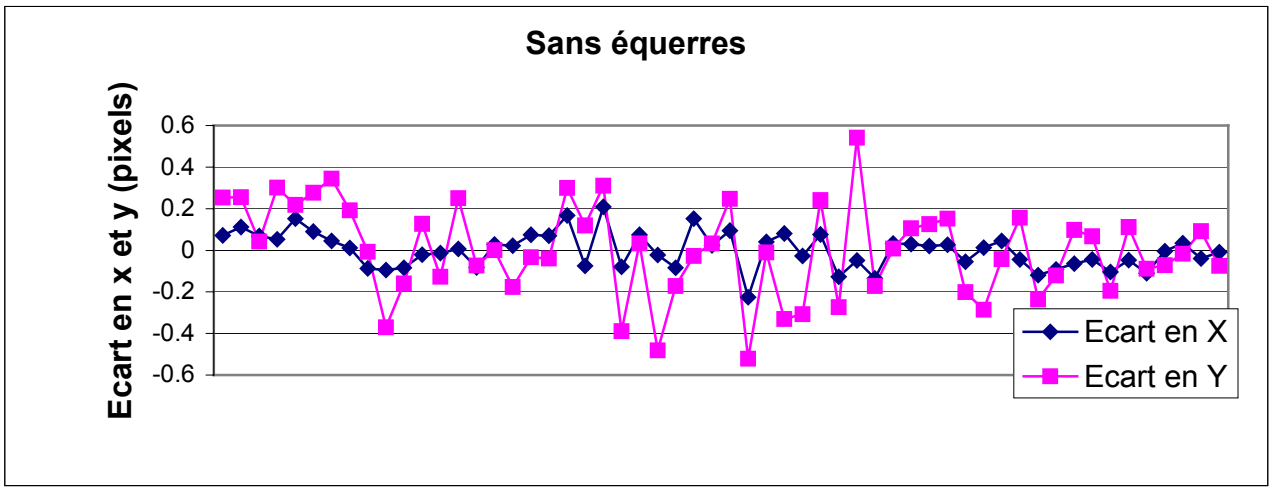


figure B.3.9 *: mesures des écarts par rapport à la moyenne des décalages en X et en Y sans les équerres*

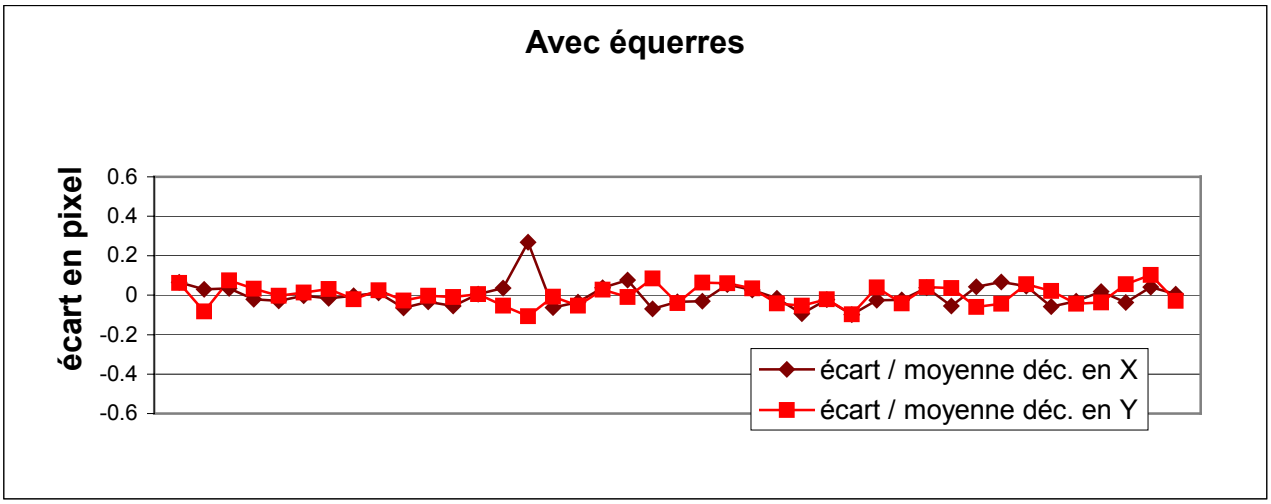


figure B.3.10 *: mesures des écarts par rapport à la moyenne des décalages en X et en Y avec les équerres*

Étalonnage des caméras

L'étalonnage radiométrique des caméras pourrait se faire de manière absolue, si l'on disposait d'une source calibrée. Comme ce n'est pas le cas, les images sont seulement corrigées des effets de l'optique et de la variation des sensibilités des pixels. Ceci nécessite la mesure d'un champ uniforme (image uniformément blanche) dans les mêmes conditions que celles de la prise de vue que l'on veut corriger : temps de pose et ouverture.

L'identité du temps de pose est nécessaire si l'on utilise la compensation de filé électronique : chaque pixel de l'image transite par plusieurs pixels du capteur, et sa sensibilité finale est une combinaison de celles de ces pixels. Le courant d'obscurité est évalué ainsi que le talon du convertisseur analogique/numérique par la mesure dans les images de la réponse dans certaines colonnes masquées, prévues à cet effet par le constructeur du capteur. Il est soustrait des images pendant le traitement. La stabilité de la réponse colorimétrique repose entièrement sur la stabilité de réaction de l'obturateur : il faut que le temps de pose programmé par le système soit rigoureusement respecté par le dispositif électro-mécanique. Ceci n'est réalisé que si les temps de pose sont longs par rapport au temps de réponse du système. Celui-ci varie d'un type d'obturateur à l'autre. Des variations de l'ordre de la dizaine de microsecondes ont été mesurées. Les temps de pose couramment utilisés sont de l'ordre de quelques millisecondes. L'étalonnage géométrique se limite à celui de la caméra verte, puisque les autres images sont superposées à l'image verte qui, elle, reste inchangée.

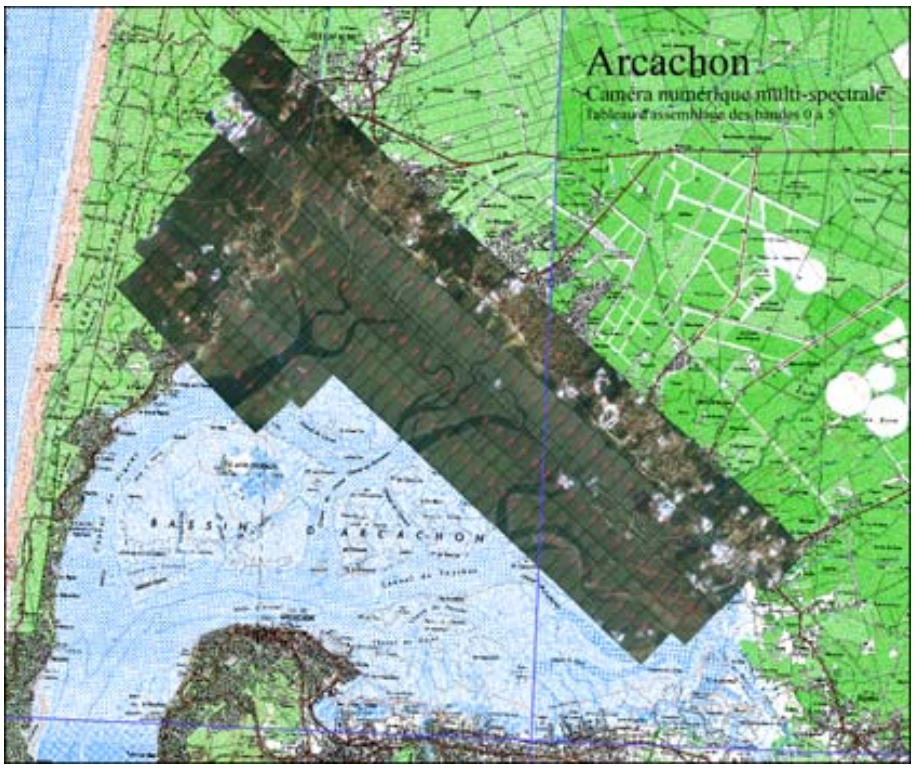


figure B.3.11 : *tableau d'assemblage des imagettes de la mission*

Mise en œuvre du système sur le Bassin d'Arcachon

Objectifs de la mission

Dans le cadre du projet européen TERRA, le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) a demandé à l'IGN d'organiser une prise de vues aériennes sur la partie Nord du Bassin d'Arcachon. Cette prise de vues devait se dérouler en deux étapes :

- une acquisition au pixel sol de 80 cm d'images noir & blanc dans le canal proche infra-rouge, en octobre 1999. Une caméra équipée d'un capteur 4k x 4k a survolé la zone d'intérêt trois fois de suite, à différents moments de la marée montante,
- une acquisition au pixel sol de 50 cm d'images numériques couleur issues de la nouvelle caméra multi-canaux. Cette mission s'est déroulée le 30 juin 2000.

Le but de cette mission était de cartographier les zones où poussent les spartines, plantes aquatiques situées sur les platières au Nord et sans doute liées à l'ensablement progressif du Bassin d'Arcachon. Le survol devait donc être centré sur l'heure de basse mer, heure locale, soit à 11 h 05. Nous avons décollé à 8 h 50, heure locale de la Base de Creil et nous étions sur site à 10 h 42.

figure B.3.12
Aperçu des conditions météorologiques sur le Nord du Bassin d'Arcachon.

Plan de vol

La météo n'a malheureusement pas été aussi bonne que les prévisionnistes l'avait annoncée avant notre départ. En effet, arrivés sur site, nous avons constaté que seul l'intérieur du Bassin d'Arcachon était dégagé, à quelques cumulus près. Afin d'éviter au maximum la présence de nuages sur les images, nous avons suivi un plan de vol original : au lieu des six axes de vol représentés figure B.3.11 (page précédente) et initialement prévus, nous avons en fait, acquis neuf bandes d'images, c'est-à-dire trois axes en double.

Exemples d'images couleur

La figure B.3.13 (page suivante) présente un extrait d'image couleur et les trois plans colorés qui la composent. Les plus petits détails ponctuels clairs, comme les cheminées sur les toits, sont parfaitement recalés et ne présentent pas les petites irisations qui seraient signe d'un mauvais positionnement relatif des plans-extensions.

Extensions

Remplacement des capteurs

Comme nous l'avons déjà écrit, le prototype ayant volé sur le Bassin d'Arcachon n'était qu'une version temporaire destinée à valider le système en attendant la livraison de capteurs noir & blanc 4k x 4k, renforcés dans le bleu et pourvus d'un dispositif anti-éblouissement. L'intégration de ces nouveaux capteurs se fera dans les mois à venir.

Remplacement des optiques

La plus grande taille des capteurs impliquant de meilleures performances optiques des objectifs en bord de champ, leur intégration s'accompagnera de la mise au point de l'interface de commande de nouveaux objectifs (Rollei Digitar), mieux adaptés à notre utilisation, car ils n'ont pas de réglage de mise au point. Ils sont donc beaucoup plus compacts, plus légers, plus rigides, et indéréglables. Ils sont aussi moins chers que ceux que nous avons utilisés jusqu'à présent. Par contre, ils n'ont pas la même interface de commande que ceux-ci, et une adaptation des caméras est donc nécessaire.

Réalisation d'une caméra couleur à double fauchée

Nous avons réalisé, suivant le même principe, un instrument composé de deux caméras équipées chacune d'un capteur couleur Kodak KAF-6302CE. Ce capteur de 3 052 x 2 016 pixels est, en plusieurs points, similaire à celui utilisé sur l'Ile de France, si ce n'est que sa réponse est accentuée dans les longueurs d'onde du bleu et que sa taille en pixels est plus petite. Une caméra est dépointée vers la gauche de l'axe de vol et l'autre vers la droite ; ainsi en assurant un recouvrement d'environ 150 pixels, on obtient une image résultante d'environ 6 000 pixels de large.

Nous ne nous attarderons pas à décrire plus précisément la composition de ce système, car il est très semblable à la caméra multi-canaux. On a juste ôté un rack informatique et remplacé les trois têtes de caméra par une caméra gauche « maître » et une caméra droite « esclave ». Les logiciels de gestion sont eux rigoureusement les mêmes. Un des grands intérêts de ce système est que, si les caméras sont équipées d'objectifs de focale 40 mm, la fauchée obtenue est presque équivalente à celle d'une caméra RMK TOP, munie d'un cône de 152 mm de focale. On peut ainsi doubler en numérique des missions traditionnelles sans surcoût lors de la prise de vue.

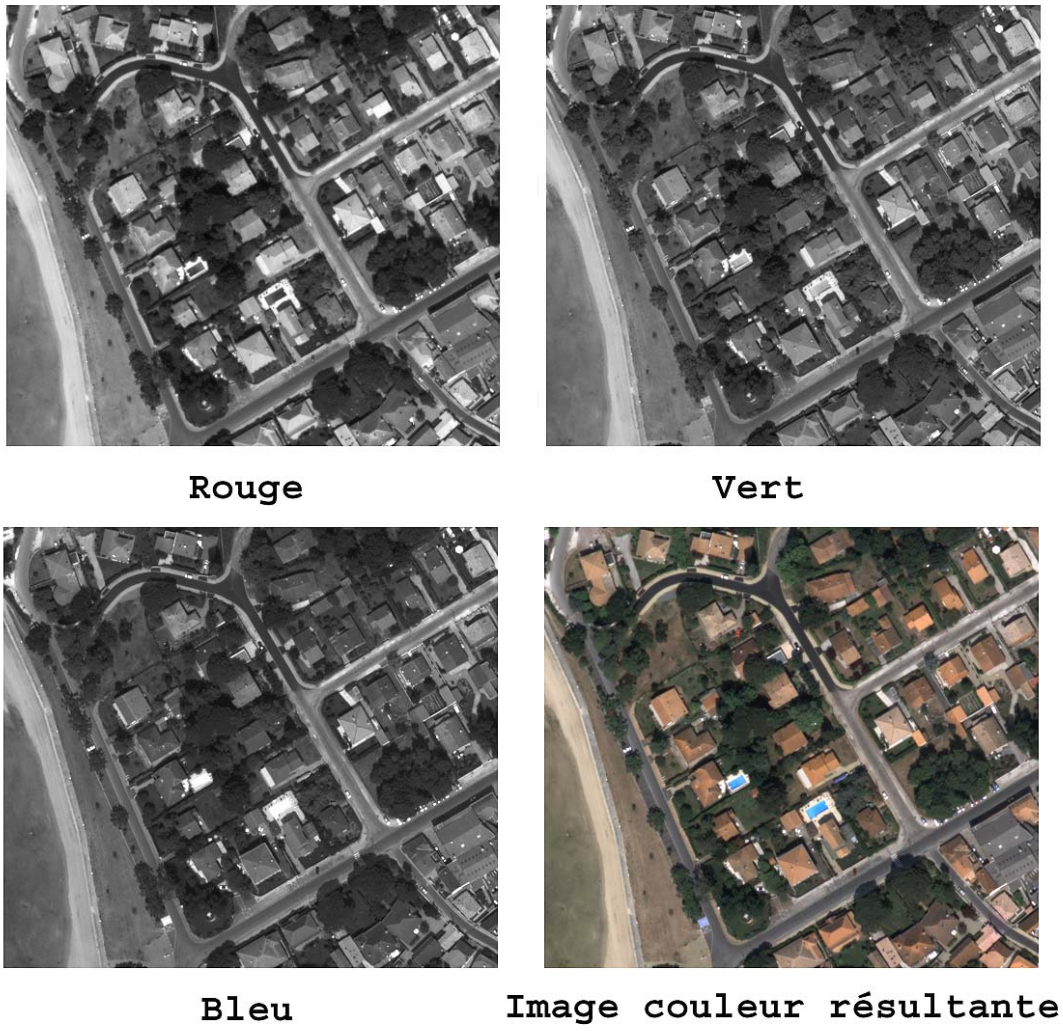


figure B.3.13
Exemple d'extrait d'image dans chaque plan RVB et dans l'image recalée avec les paramètres de l'homographie.

On obtient malheureusement, malgré tout, une résolution au sol plus faible que celle que l'on peut obtenir avec la RMK TOP, qui serait équivalente si on numérisait les clichés au pas de 34 microns environ. Il reste à voir si l'amélioration de la qualité radiométrique dans les images numériques pourra compenser ce déficit de résolution.

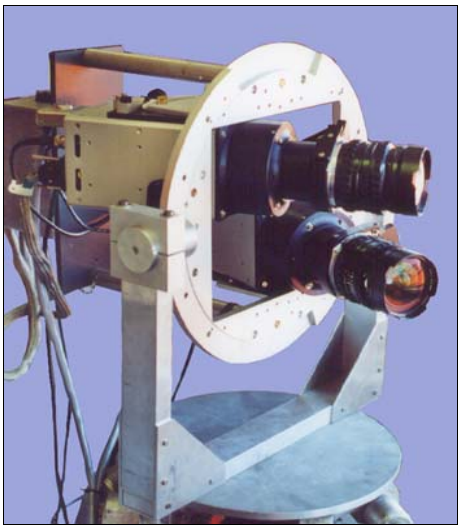


***figure B.3.14** : la caméra couleur double fauchée*

Particularités des images

Vu la configuration géométrique du système, les images ne sont pas à axe vertical. La taille au sol des pixels est donc variable dans une proportion qui dépend de la focale des objectifs choisis. Avec le 40 mm que nous avons utilisé, l'échelle varie d'environ +/- 10 %, d'un bord à l'autre de l'image. Il est donc nécessaire de rééchantillonner les images si l'on veut, soit les assembler par paires pour produire une image deux fois plus grande, soit les utiliser à la manière des images traditionnelles. Par contre, si elles sont utilisées pour faire de l'orthophotographie, on peut les conserver telles qu'elles, le processus de rectification de l'orthophotographie se chargeant du rééchantillonnage.

On pourra voir, figure B.3.15, deux petits extraits de la zone commune aux deux images d'une paire. On pourra constater que le rendu des couleurs est sensiblement le même, bien que ce soit deux caméras différentes qui ont pris ces images. Rappelons qu'elles ont subi exactement les mêmes traitements radiométriques. La figure B.3.16, page suivante, montre une paire d'images fortement sous-échantillonnées.

***figure B.3.15** : extraits d'images dans la partie commune*

Missions réalisées

Deux missions ont été réalisées à ce jour avec ce système.

D'une part, une mission traditionnelle d'orthophotographie à grande échelle sur la région d'Orléans qui a été doublée en numérique, à titre de test. Cela représente quand même 1 300 paires de clichés. Le pixel sol obtenu est environ 35 centimètres. Cette mission résulte d'une commande interne à l'IGN. D'autre part, une couverture du lit de la Loire supérieure a été réalisée au pixel d'un mètre, pour un client extérieur, la DIREN Centre (Direction Régionale de l'Environnement). Cela représente 340 paires d'images.

figure B.3.16 *: une paire d'images*

Extensions

Remplacement des capteurs

Là aussi, le remplacement des capteurs par des capteurs de plus grande dimension, 4k x 4k, par exemple, est possible en panchromatique. Il est aussi envisageable en couleur pour l'avenir, car le capteur 4k x 4k est annoncé par KODAK dans une version couleur. Ceci permettrait de réaliser à faible coût des missions couleur de qualité.

figure B.3.17 *: la cathédrale d'Orléans*

Version à quatre caméras

Il est possible d'envisager un système à quatre caméras visant à la fois sur les côtés et en avant-arrière. Le dispositif obtenu ainsi permettrait d'acquérir des images à plus haute résolution (pixel sol décimétrique), et avec un rapport base sur hauteur de vol (B/H) suffisant pour faire de la restitution photogrammétrique. Le système à deux caméras est en effet davantage pensé pour faire de l'orthophotographie, les B/H que l'on peut obtenir n'étant pas suffisants pour avoir une bonne précision sur la coordonnée verticale.

Conclusion

On peut dire maintenant que le concept de caméra multi-canaux est validé. Il reste évidemment à en améliorer l'ergonomie, mais, dès maintenant, nous disposons d'outils nous permettant d'acquérir des images aériennes couleur de très grande qualité avec une excellente dynamique et un très bon rendu colorimétrique. Ceci qui nous ouvre tout un nouveau domaine : la télédétection à haute résolution, ou de multiplier la fauchée de nos caméras isolées, qu'elles soient panchromatiques ou couleur, ce qui permettra de diminuer les coûts et les temps de vol de manière appréciable.

Référence

[MAAS et al 00] H.-G. Maas, Ch. Thom, J.-Ph. Souchon and C.K. Toth *: Digital Camera Experts Present their Views,* "Three-Line Linear" versus "Multi-Head Array", in revue GIM International, pp. 68-71, laboratoire OEMI, IGN-SR 00-002/L-ART-HGM, mai 2000.

B.4 Amélioration de la précision de la composante altimétrique du GPS par une correction du délai troposphérique utilisant une mesure externe du contenu en vapeur d'eau

Jérôme Tarniewicz

Contexte

Depuis 1999, le laboratoire OEMI poursuit une action de recherche axée sur le nivellement de précision par GPS. L'année 2000 constitue la première année d'un travail de thèse entrepris par Jérôme Tarniewicz en collaboration avec Olivier Bock de l'ESGT du CNAM, sous la direction de Michel Kasser du Service de Géodésie et de Nivellement (SGN) et de Jacques Pelon du Service d'Aéronomie du CNRS.

Introduction

L'objectif est d'effectuer du nivellement par GPS et du positionnement géodésique avec une précision de l'ordre du millimètre sur la composante verticale. La précision du positionnement par système GPS est limitée par la configuration géométrique des satellites dans le ciel, la qualité des récepteurs utilisés et tous les problèmes auxquels un signal radioélectrique se propageant entre un satellite et un récepteur peut être confronté sur son trajet. Ce sont ces derniers qui retiennent ici notre attention et plus particulièrement les effets atmosphériques au sein de la troposphère. Dans la troposphère, les gaz atmosphériques et la présence de la vapeur d'eau influent sur la propagation des signaux et se traduisent en termes d'allongement des distances parcourues entre les satellites et le récepteur au sol. La partie hydrostatique de cet allongement est peu variable et, de ce fait, relativement bien modélisée.

En revanche, la partie humide est plus problématique, puisque les inhomogénéités de répartition et de dynamique de la vapeur d'eau dans l'atmosphère conduisent à une grande variabilité de l'allongement humide, ce que les stratégies de traitement de données GPS actuelles ne peuvent pas corriger. Il est donc impératif d'évaluer au mieux cet allongement troposphérique si l'on désire obtenir une précision subcentimétique sur les coordonnées d'une station. Un système de mesure du contenu en vapeur d'eau atmosphérique est donc à l'étude et devrait fournir une correction externe de l'allongement humide.

Afin de poser le contexte d'étude de cette thèse, nous rappellerons dans un premier temps, les principes du positionnement par GPS, puis nous nous pencherons sur la théorie et la modélisation du délai troposphérique, et notamment sur les erreurs que peuvent engendrer des inhomogénéités atmosphériques sur la composante altimétrique du GPS. Nous conclurons enfin sur une étude préliminaire de développement d'un prototype de lidar transportable en vue de la correction du délai troposphérique humide.

Le système GPS

Présentation

Le segment spatial du système GPS est composé de vingt-huit satellites à une altitude d'environ 20 200 km. À tout instant, chaque observateur à la surface de la terre est en mesure d'observer les signaux en provenance d'au moins quatre satellites. Ces satellites émettent deux signaux sur les porteuses modulées L1 et L2. Deux types de mesures peuvent être effectués, suivant le récepteur dont on dispose : la mesure de pseudo-distance et la mesure de phases. Pour atteindre des précisions subcentimétiques sur les coordonnées d'une station, on utilise les mesures de phases et l'on positionne cette station au sein d'un réseau, dont les stations ont des coordonnées connues. En combinant les observations sur plusieurs satellites et entre plusieurs stations, on forme successivement les simples et doubles différences qui permettent de s'affranchir respectivement des erreurs d'horloge des satellites et des erreurs d'horloge des récepteurs.

Les sources d'erreur

Différentes orbites de satellites sont disponibles. Leur qualité va varier suivant la rapidité avec laquelle elles sont mises à la disposition des utilisateurs. À titre d'exemple, les orbites finales IGS, disponibles après onze jours, sont précises à 4 cm [ROTHACTHER, MERVART 96]. L'impact des erreurs d'orbites dépend aussi de la longueur de la ligne de base que l'on considère. Pour notre type d'application, on peut s'attendre à une erreur de l'ordre de 0,002 ppm pour une ligne de base de 100 km. Dans l'ionosphère, le signal GPS est retardé par son interaction avec les électrons libres. Ce délai ionosphérique est important et varie entre 1 et 20 m, mais est dépendant de la fréquence. Ainsi, une combinaison linéaire de L1 et L2, judicieusement choisie, permet d'en corriger la majeure partie, le reste étant éliminé par des modèles de délai ionosphérique dans le traitement GPS.

La variation du centre de phase des antennes des récepteurs est problématique, puisqu'elle n'est pas systématique, et dépend aussi du vieillissement de l'antenne. Une calibration régulière de l'antenne permet de s'en affranchir.

L'erreur de multi-trajet est due à la réflexion du signal sur des surfaces avoisinant l'antenne et peut conduire à quelques centimètres d'erreur sur les mesures de phases, notamment pour les satellites bas sur l'horizon. Le seul moyen efficace de corriger cet effet est de choisir un site de mesure dégagé ou d'effectuer des mesures avec un angle de coupure > 15-20°.

La réfraction troposphérique est finalement la principale source d'erreur prédominante sur le positionnement par système GPS. Elle fait l'objet de l'étude de la partie suivante.

La modélisation de la réfraction troposphérique

Réfractivité et délai

La troposphère constitue la couche la plus basse de l'atmosphère. Son sommet se situe généralement vers 10 km pour nos latitudes. Lorsque le signal GPS se propage dans cette couche d'atmosphère, il y subit l'effet de la variation de l'indice de réfraction, ce qui se traduit par deux phénomènes : le retard de propagation et la courbure de la trajectoire.

Le délai troposphérique ΔL s'écrit comme la différence entre la distance géométrique pondérée de l'indice de réfraction L parcourue par le signal le long de sa trajectoire et la distance G parcourue en ligne droite s'il se propageait dans le vide.

En considérant la distance géométrique S parcourue le long de la trajectoire du signal, le délai troposphérique s'écrit [DODSON et al 96] :

$$\Delta L = L - G = (L - S) + (S - G) = \int_S (n-1)ds + (S - G) .$$

Le premier terme exprime le retard de propagation du signal en raison de la variation de l'indice de réfraction dans la troposphère. Le second terme correspond à l'effet de courbure. Il est négligeable, puisqu'il représente ~ 0,1 % du délai total [ICHIKAWA 95].

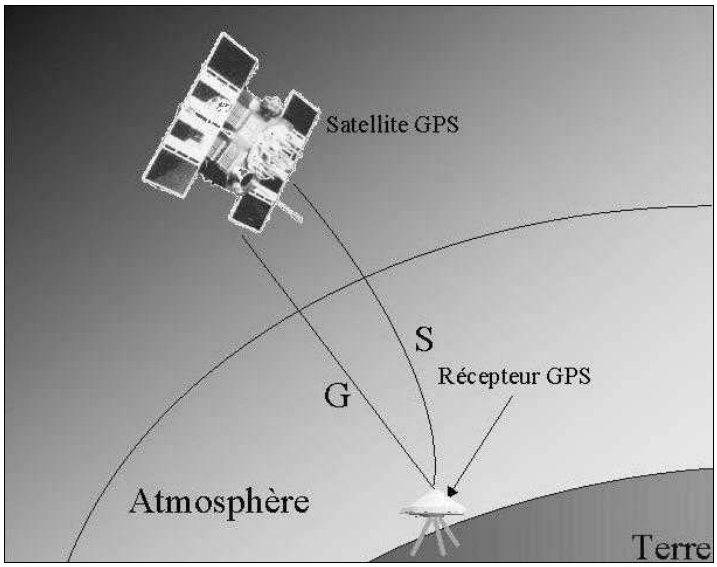


***figure B.4.1** : géométrie de l'allongement troposphérique du signal GPS*

En introduisant la réfractivité N, le délai s'écrit :

$$\Delta L = \int_S (n-1)ds = 10^{-6} \int_S N ds$$

Pour modéliser le délai troposphérique, il est donc nécessaire de déterminer l'intégrale de la réfractivité le long de la trajectoire du signal GPS. La réfractivité peut être écrite en fonction de la densité totale de l'air ρ et de la densité de vapeur d'eau ρ_v contenue dans l'atmosphère [THAYER 74] :

$$N = k_1 R_d \rho + k'_2 R_v \rho_v + k_3 R_v \frac{\rho_v}{T}$$

où R_d et R_v sont les constantes spécifiques des gaz parfaits respectivement pour l'air sec et la vapeur d'eau, T la température atmosphérique et k_1, $k'_2 = k_2 - (R_d / R_v)k_1$, k_3 sont des constantes déterminées expérimentalement [THAYER 1974].

Délai zénithal et fonction angulaire

Le délai troposphérique ΔL dans une direction donnée est proportionnel au délai troposphérique ΔL^z dans la direction zénithale à un terme angulaire prés, la fonction angulaire $m(\zeta)$, où ζ est l'angle zénithal.

On utilise généralement une fonction différente pour la partie hydrostatique et humide. Le délai troposphérique s'exprime alors comme :

$$\Delta L = m(\zeta) \times \Delta L^z = \Delta L^z_h \times m_h(\zeta) + \Delta L^z_w \times m_w(\zeta)$$

avec :

$\Delta L^z_h = 10^{-6} k_1 R_d \int_0^\infty \rho(z) dz$, le délai zénithal hydrostatique (ZHD),

$\Delta L^z_w = 10^{-6} R_w \left\{ k'_2 \int_0^\infty \rho_w(z) dz + k'_3 \int_0^\infty \frac{\rho_w(z)}{T(z)} dz \right\}$, le délai zénithal humide (ZWD).

Le ZHD constitue près de 90 % du délai total, soit environ 2,30 m. Il dépend de la densité totale de l'air. Il varie donc peu et peut être modélisé entièrement à partir de données météorologiques de surfaces. Saastamoinen [SAASTAMOINEN 72] propose une modélisation de ΔL^z_h qui tient compte de la latitude du site, de la pression au sol et de l'altitude de la station au-dessus du géoïde.

Le ZWD représente environ 10 % du délai total, mais fluctue beaucoup autour de sa moyenne. Il peut varier entre 5 et 25 cm, au cours d'une même journée. Sa modélisation est plus difficile car il est très peu corrélé avec les données météorologiques de surface [DODSON et al 96] et dépend du profil de densité de vapeur d'eau. Lors du passage d'un front, les variations spatiale et temporelle du contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère peuvent être rapides et importantes. Néanmoins, à défaut d'une modélisation plus réaliste, on utilise encore le modèle de Saastamoinen.

Actuellement il existe deux méthodes dans le traitement des données GPS pour réduire le délai troposphérique [BOCK, DOERFLINGER 01]. Après une correction *a priori* du délai troposphérique zénithal par un modèle météorologique empirique tel que celui de Saastamoinen, on estime des paramètres troposphériques spécifiques à chaque station par un processus déterministe (ajustement par moindres carrés) ou stochastique (filtrage de Kalman). Cette correction utilise donc les données GPS. Une autre possibilité est de corriger le délai troposphérique humide en utilisant une mesure du contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère par un radiosondage, un spectromètre solaire ou un radiomètre. C'est une correction externe au traitement GPS.

Étude de l'influence des inhomogénéités atmosphériques

Contexte météorologique

L'objectif, pour l'IGN, est de pouvoir effectuer du positionnement précis par GPS, sur des bases courtes, de l'ordre de 100 km, pendant des durées d'observation courtes, typiquement 1-2 heures. À ce niveau d'échelle temporelle, plusieurs phénomènes atmosphériques peuvent se produire. On distingue ainsi les rouleaux, les cellules kilométriques et la turbulence à petite échelle [LEMONE 76].

La turbulence à petite échelle produit des fluctuations aléatoires d'une durée de vie de l'ordre de la seconde. Une session d'observation d'une heure, avec des données acquises toutes les trente secondes, permet donc de moyenner l'effet de ce type de perturbation. Cependant, la fusion de plusieurs de ces turbulences à petite échelle peut engendrer la naissance de perturbations plus importantes dans la couche limite atmosphérique, les thermiques. Ces phénomènes ont des durées de vie plus longues (10-30 min) et une extension horizontale entre 100 m et 1 km.

Les thermiques sont convectifs, le flux ascendant transporte de l'air chaud et humide, le flux descendant transporte de l'air froid et sec [LEMONE 76] et sont régulièrement espacées de 1 à 2 km.

Les variations de température et de rapport de mélange y sont de l'ordre, respectivement, de 0,2-2 K et 0,2-1 g/kg [LENSCHOW, STEPHEN 80]. Elles se déplacent à 70-80 % de la vitesse moyenne du vent dans la couche limite atmosphérique et dans la même direction [STULL 88].

Modélisation des perturbations à petite échelle

Afin d'étudier l'influence de ce type d'inhomogénéité atmosphérique sur la précision de positionnement par GPS, un modèle simple de perturbation a été développé. Il s'agit d'une perturbation de forme sphérique, placée dans un repère local centré sur la station à positionner. Ces sphères, d'un rayon de 500 m, sont situées à une altitude de 1 km, dans un plan horizontal qui matérialise le sommet de la couche limite atmosphérique.

Elles constituent une variation d'indice de réfraction de 10 ppm avec le milieu où elles sont plongées, soit : pour une sphère située au zénith de la station, une variation d'allongement troposphérique de 1 cm, ce qui représente une variation de 1,5 g/kg du rapport de mélange. Afin de tenir compte d'une éventuelle dynamique atmosphérique, une vitesse de défilement peut être prise en compte. La sphéricité des perturbations est discutable car les inhomogénéités ont en réalité une forme plus complexe. L'interface perturbation - atmosphère n'est pas aussi tranchée que dans notre modèle. Aucune évolution de taille des perturbations n'est prise en compte.

Trois cas statiques et deux cas dynamiques, représentés sur la figure B.4.2, sont considérés et simulés :

- une perturbation au zénith, une perturbation décalée vers le sud et 3 x 3 perturbations sur un quadrillage régulier de 2 km de maille constituent les trois cas statiques étudiés ;
- un quadrillage régulier de 2 km de maille, se déplaçant à la vitesse de 2 m/s, d'extension infinie suivant l'axe Est-Ouest, centré et décalé de 250 m vers le sud, constituent les deux cas dynamiques.

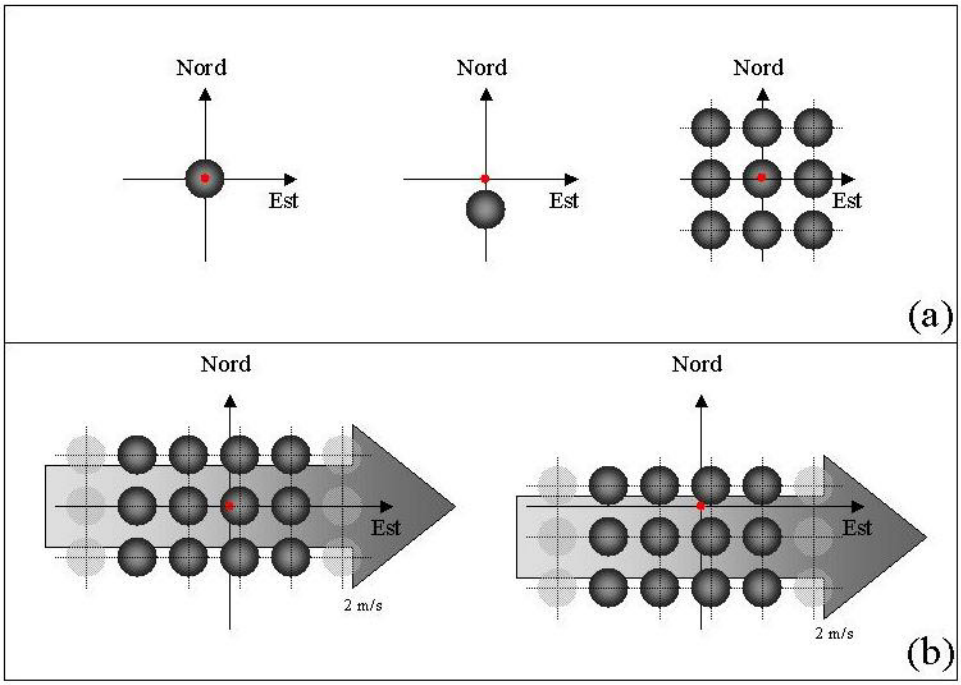


figure B.4.2

Configurations de perturbations simulées,
dans le cas statique (a) et dynamique (b) avec une vitesse de défilement de 2 m/s.

Simulation et traitement de données GPS

Afin d'évaluer l'impact des perturbations précédemment décrites sur la précision du positionnement GPS, des données GPS ont été simulées. Les données d'une campagne réelle comportent déjà une empreinte atmosphérique non quantifiable de manière aussi précise que le permet l'utilisation de données simulées non bruitées, exemptes de toute influence troposphérique. Deux méthodes de simulation et de traitement de données sont retenues.

Dans ces deux méthodes, le délai troposphérique résultant de la présence des perturbations est fonction de l'azimut α et l'angle zénithal ζ sous lesquels sont observés les satellites dans le repère local centré sur la station. Si $d(\alpha,\zeta)$ est la distance parcourue dans la direction définie par (α,ζ) à travers une perturbation, le délai troposphérique est directement proportionnel à $d(\alpha,\zeta)$ et à la différence d'indice avec le milieu environnant la sphère.

La méthode de Santerre [SANTERRE 91]

Cette méthode est basée sur un ajustement des moindres carrées des données GPS. Les observables sont les simples différences sur les mesures de phase entre deux récepteurs. Par un formalisme entièrement analytique de la matrice normale, de son inverse et du vecteur normal, cette méthode permet une étude simplifiée de l'impact de certaines erreurs et biais sur la précision du positionnement, notamment l'influence d'un biais troposphérique.

La matrice et le vecteur normaux ne dépendent plus alors que de α et ζ. Effectuer une observation sur plusieurs satellites revient donc à balayer un secteur angulaire du ciel dans lequel α et ζ varient continûment. Cette méthode permet donc l'étude de l'influence de l'angle de coupure d'observation ζ_{max}. Les paramètres estimés sont les coordonnées de la station à positionner, une correction d'horloge pour le récepteur qui permet d'assurer l'équivalence avec une méthode de résolution en double différence [LINDLOHR, WELLS 85], ainsi qu'un paramètre troposphérique relatif.

La principale limite de cette approche est l'incapacité d'inclure une notion temporelle dans l'estimation des paramètres : un seul couple de paramètre troposphérique et d'horloge est estimé par session simulée, alors qu'il est courant s'estimer une correction troposphérique toutes les deux heures et une paramètre d'horloge par époque dans un traitement classique. De plus, on fait une hypothèse de distribution uniforme et continue des observations dans le ciel de l'observateur, ce qui revient approximativement à simuler une session longue.

Simulation avec le logiciel Bernese GPS Software 4.0

Cette méthode de simulation de données est plus lourde à mettre en œuvre que la précédente mais pallie à ces manques. Elle permet l'étude de sessions courtes, l'estimation de plusieurs paramètres troposphériques par session et surtout, un traitement des données simulées identique à celui des données GPS réelles. Nous avons choisi de traiter la ligne de base Gênes - Turin, pour la journée du 21 octobre 1999. Les données GPS de phases et de pseudo-distance sur L1 et L2 sont simulées par le module GPSSIM [ROTHACHER, MERVART 96], à partir des coordonnées des deux stations et des orbites recalculées par l'IGS.

L'erreur due aux perturbations atmosphériques des configurations décrites précédemment est ensuite incluse aux fichiers de données de la station de Gênes. Les simples différences sont formées, et les coordonnées de Gênes sont estimées par doubles différences. La résolution s'effectue par un ajustement par moindres carrés avec le module GPSEST [ROTHACHER, MERVART 96]. Lorsque des paramètres troposphériques sont estimés, une correction *a priori* suivant le modèle de Saastamoinen est appliquée. Les paramètres de gradients ne sont pas étudiés ici puisqu'il semblerait qu'ils n'apportent pas d'améliorations sensibles dans les solutions [BAR-SEVER et al 98].

Résultats

Ces résultats font l'objet d'une soumission dans le *Geophysical Research Letter* [BOCK et al] (en relecture).

Les cas statiques sont traités avec la méthode de Santerre. On compare l'erreur commise sur l'altitude de la station avec et sans estimation d'un paramètre troposphérique, suivant l'angle de coupure ζ_{max}. Comme on peut le voir sur la figure B.4.3 (page suivante), quels que soient les cas statiques considérés, l'erreur en altitude est amplifiée d'un facteur 2 à 10 dés lors qu'on estime un paramètre troposphérique avec, par exemple, à 75°, une erreur qui augmente de 8 mm à 25 mm. Cette dégradation s'explique par la variation supposée en $1/\cos\zeta$ du délai troposphérique lorsqu'un paramètre troposphérique est estimé, alors qu'on est en présence d'une inhomogénéité sphérique.

Les cas dynamiques sont traités à l'aide du Bernese GPS Software 4.0, avec, pour chaque cas, estimation ou non d'un paramètre troposphérique. Pour une session de vingt-quatre heures, lorsque les perturbations défilent d'ouest en est, l'erreur verticale disparaît si on n'estime pas de paramètre troposphérique, ce qui prouve que l'effet des perturbations est lissé sur de longues périodes d'observations. Par contre, en estimant des paramètres troposphériques, l'amplification de l'erreur observée dans le cas statique demeure. La figure B.4.4 (page suivante) met en évidence l'influence des inhomogénéités atmosphériques sur des sessions courtes d'une durée. L'erreur verticale est très variable, mais elle reste toujours plus importante lorsqu'un paramètre troposphérique est estimé.

Les données GPS sont simulées sans délai troposphérique, ce qui équivaut à des données GPS réelles parfaitement corrigées d'un allongement troposphérique moyen. L'erreur commise dans l'inversion des mesures correspond donc à l'effet des perturbations atmosphériques en termes de délai humide.

Les résultats des simulations montrent qu'en présence de ces perturbations, une meilleure précision sur l'altitude d'une station est obtenue si on n'estime pas de paramètres troposphériques.

Les fonctions angulaires actuellement utilisées dans les traitements GPS ne sont donc pas adaptées aux variations angulaires du délai humide. Deux solutions sont envisageables : ne plus estimer de paramètres troposphériques et mesurer de manière absolue la quantité de vapeur d'eau dans la direction de chaque satellite afin de corriger le délai humide sur chaque mesure ou déterminer une nouvelle fonction angulaire expérimentale, valable pendant les observations GPS.

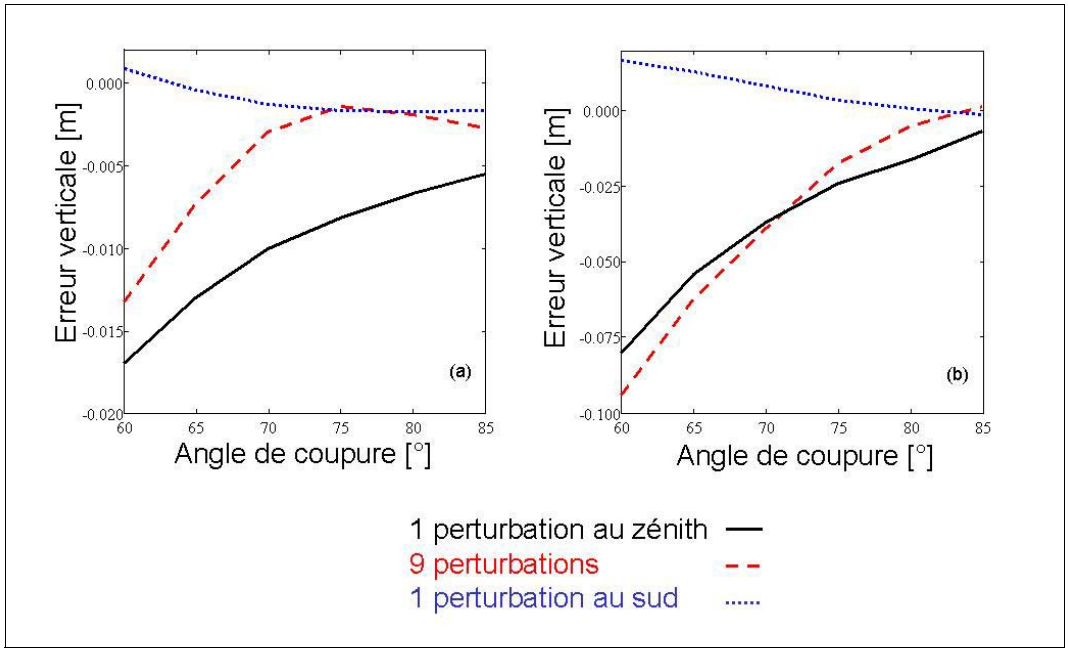


figure B.4.3

Erreur sur la coordonnée verticale en fonction de l'angle de coupure ζ_{max} sans (a) et avec (b) estimation de paramètre troposphérique.

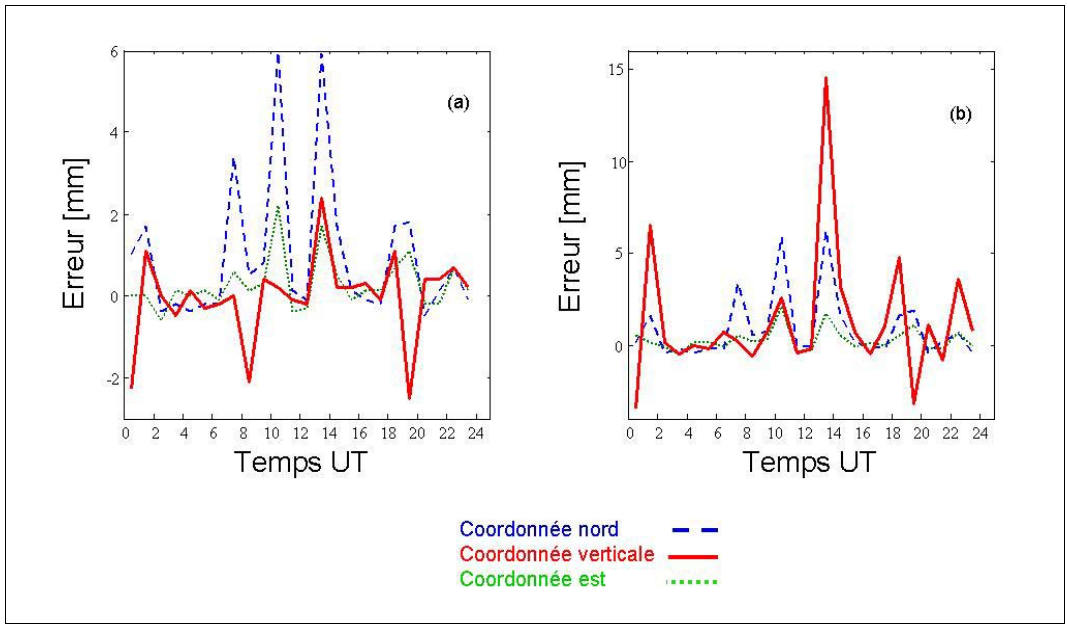


figure B.4.4

Erreur sur les coordonnées d'une station en fonction de l'angle de coupure ζ_{max} sans (a) et avec (b) estimation de paramètre troposphérique pour des sessions d'observation d'une heure, pour une perturbation décalée au sud.

Mesure de la vapeur d'eau par lidar

La correction par estimation d'un paramètre troposphérique n'est pas robuste en présence d'inhomogénéités atmosphériques, pour le niveau de précision que l'on recherche. Il faut donc envisager un moyen de mesurer le contenu en vapeur d'eau pour effectuer une correction externe du délai humide.

Il existe plusieurs techniques de sondage de la vapeur d'eau atmosphérique. Jusqu'à présent, la meilleure technique est la radiométrie à vapeur d'eau. Il s'agit d'une mesure du contenu intégré en vapeur d'eau dans la direction des satellites observés.

Elle permet d'obtenir une précision verticale de 2,6 mm [WARE et al 93] et 1,2 mm [ALBER et al 97] contre 5 mm avec les mêmes données en estimant des paramètres troposphériques. Cependant les méthodes de calibration du radiomètre limitent sa précision intrinsèque et nécessitent l'utilisation d'une température moyenne dans l'évaluation du délai humide.

L'utilisation du contenu intégré en vapeur d'eau peut produire des erreurs de ~ 5-8 mm en présence d'inversion de température [BOCK et al 01]. Un lidar Raman semble donc plus adapté puisqu'il permet d'obtenir simultanément un profil de vapeur d'eau et un profil de température pour le calcul du délai humide.

Equations du lidar

L'observation de la vapeur d'eau par lidar Raman en recherche météorologique est relativement ancienne [MELFI et al 69] bien que non généralisée. La mesure est basée sur un processus de diffusion moléculaire inélastique caractérisé par un décalage en fréquence spécifique à la molécule diffusante par rapport à la fréquence de l'onde émise par le laser. Pour la vapeur d'eau, le décalage en fréquence est de 3 652 cm^{-1} [INABA 76], ce qui correspond à une longueur d'onde diffusée à 407 nm pour un laser émettant à 355 nm.

***tableau B.4.1** : longueur d'onde d'observation sur les canaux Raman en fonction de la longueur d'onde d'émission du laser (355/532 nm*) [INABA 76]

Canal de mesure	Décalage en fréquence [cm^{-1}]	Longueur d'onde observée λ_x [nm]	
		λ_L = 355 nm	λ_L = 532 nm
H_2O	3 652	407,5	660,3
N_2	2 330,1	386,7	607,3

Pour un lidar dont le laser émet un pulse de durée τ à la longueur d'onde λ_L, le nombre de photons rétrodiffusés par la couche d'atmosphère à l'altitude *z* d'épaisseur $\Delta z = c\tau/2$ détectés par le télescope d'observation de surface *A* sur le canal Raman *x* est donné par [WHITEMAN et al 92] :

$$S_x = \eta_o \eta_q S_0 \frac{A\Delta z}{z^2} O_x(z) T(0,z,\lambda_L) T(0,z,\lambda_x) \sigma_x(\pi,\lambda_L) n_x(z)$$

où S_0 est le nombre de photons émis par le pulse laser, $\sigma_x(\pi, \lambda_L)$ la section efficace différentielle de rétrodiffusion Raman, $n_x(z)$ la concentration du constituant *x* . $O_x(z)$, la fonction de recouvrement, prend en compte les problèmes d'alignement et d'obturation géométrique des faisceaux à l'émission et à la réception. η_o et η_q sont respectivement les rendements optique et quantique du système de détection. $T(0,z,\lambda_L)$ et $T(0,z,\lambda_x)$ représentent les facteurs de transmission atmosphérique du sol à l'altitude *z* sur les trajets aller et retour du signal.

Le nombre de photons détectés à la longueur d'onde d'émission du laser est donné par [ANSMANN et al 92] :

$$S_{rétro} = \eta_o \eta_q S_0 \frac{A\Delta z}{z^2} O_{rétro}(z) \left[T(0,z,\lambda_L)\right]^2 \beta(\lambda_L,z)$$

où $\beta(\lambda_L,z)$ est le coefficient de rétrodiffusion volumique

Pour une mesure effectuée de jour, le signal contient également le bruit de jour S_B qui correspond à la radiation solaire parasite détectée par le système de réception. Le système de détection du prototype de lidar Raman à l'étude est composé de trois canaux de mesure. Le canal vapeur d'eau et le canal azote constituent les deux canaux Raman. Le troisième canal mesure la rétrodiffusion de l'atmosphère à la longueur d'onde d'émission du laser et constitue le canal rétrodiffusion. Le signal rétrodiffusé est isolé à la longueur d'onde désirée sur chaque canal par des filtres interférentiels. Les longueurs d'onde intervenant sur les canaux Raman sont données dans le tableau B.4.2.

Grâce aux signaux mesurés sur les canaux azote et vapeur d'eau, on obtient respectivement un profil de la température atmosphérique, qui est proportionnel à $n_{N2}(z)$, et un profil du contenu en vapeur d'eau, à condition d'avoir correctement calibré le système de détection :

- le bruit de jour S_B peut être estimé par une mesure lorsque aucune impulsion laser n'est émise ;
- les facteurs de transmissions $T(0,z,\lambda_L)$ et $T(0,z,\lambda_x)$ sont déterminés par l'inversion du signal sur le canal azote, en supposant connue la variation en longueur d'onde des coefficients d'atténuation par les aérosols. L'atténuation moléculaire est alors modélisée par la diffusion de Rayleigh. L'utilisation d'un profil d'azote provenant d'un modèle d'atmosphère standard ou d'un radiosondage contraints par une mesure de température et de pression au sol n'engendre pas d'erreur significative sur les facteurs de transmission [ANSMANN et al 92] ;
- la fonction de recouvrement $O(z)$ est déterminée par le remplacement périodique des filtres interférentiels par un filtre N_2 sur tous les canaux de mesure.

Simulation d'un lidar Raman et résultats

Des signaux sont simulés pour un laser Nd:YAG émettant à la longueur d'onde λ_L = 355 nm et λ_L = 532 nm, dans différentes conditions atmosphériques correspondant à des visibilités au sol de 10, 23 et 50 km. Les profils d'aérosols pour ces différentes visibilités sont extraits de MODTRAN [SHETTLE, FENN 79], l'atténuation par les molécules est modélisée par la diffusion de Rayleigh. Les sections efficaces différentielles de rétrodiffusion de l'azote et de la vapeur d'eau sont des valeurs expérimentales [PENNEY, LAPP 76].

Les profils d'azote et de vapeur d'eau sont des profils standards. Le système émission - réception est supposé coaxial. Les configurations instrumentales simulées à 355 nm et 532 nm sont résumées dans le tableau B.4.2 (page suivante). Pour les signaux simulés correspondant à des mesures de nuit, le bruit de jour est supposé nul (S_b = 0), ce qui diffère des conditions réelles de mesure.

Le signal mesuré de nuit sur les canaux vapeur d'eau et azote est représenté la figure B.4.5, ci-dessous, pour une accumulation de 600 tirs, soit une minute d'observation. Les différentes valeurs sur les profils correspondent à l'altitude au-dessus de laquelle le rapport signal à bruit est inférieur à 10. Pour une durée d'observation d'une minute, le sondage de nuit peut s'effectuer jusqu'à 2 km, ce qui permet de mesurer les inhomogénéités atmosphériques décrites précédemment. Les mesures à 355 nm permettent de sonder l'atmosphère plus haut que les mesures à 532 nm, car le processus Raman est plus efficace à 355 nm qu'à 532 nm.

Pour une durée d'observation plus longue, le nombre de photons accumulés est plus important, ce qui permet d'augmenter l'altitude limite du sondage. Le bruit de photon sur le canal vapeur d'eau est responsable d'une fluctuation de 3 à 3,5 mm en termes d'allongement humide, pour la visibilité la plus défavorable (10 km). Sur le canal azote, on peut obtenir un profil de température jusqu'à ~7,5 km.

Pour une mesure de jour ($S_B \neq 0$) dans les mêmes configurations instrumentales, le rapport signal sur bruit devient catastrophique, puisqu'un sondage de la vapeur d'eau à 355 nm ne monte pas au-delà de 450 m dans une atmosphère dégagée (V = 50 km), et limite donc la correction des perturbations atmosphériques.

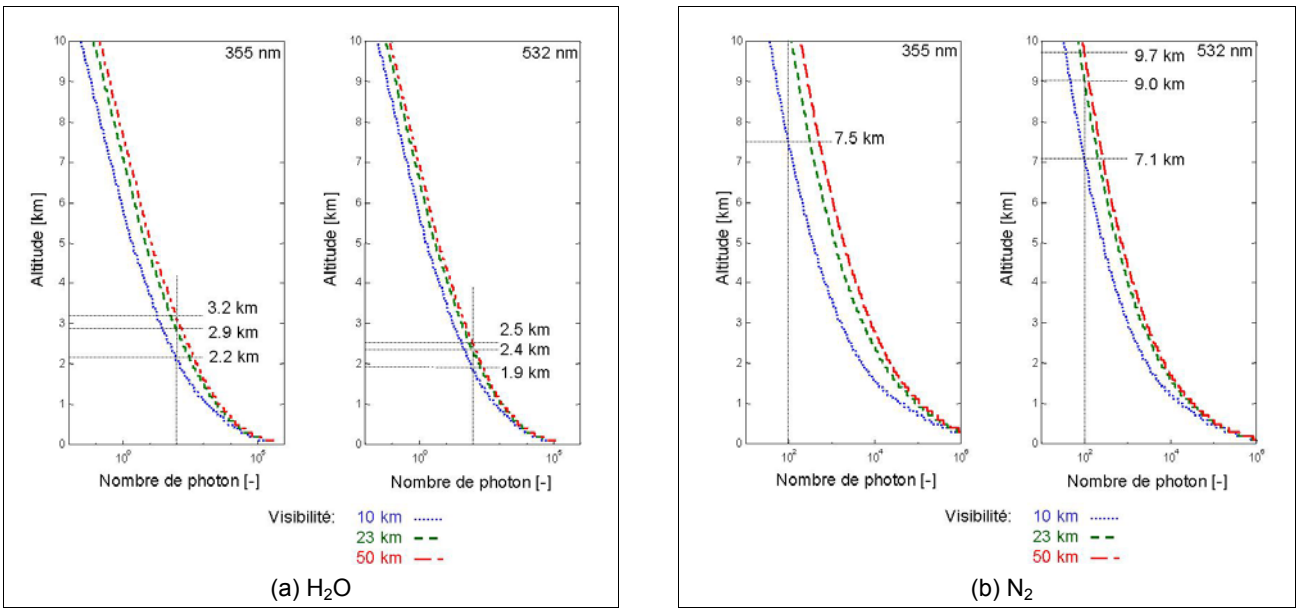


figure B.4.5

Nombre de photons accumulés pendant 1 minute d'observation
sur (a) le canal vapeur d'eau et sur (b) le canal azote, à 355 nm et 532 nm.

***tableau B.4.2** : configurations lidar Raman simulés à 355 nm et 532 nm*

Longueur d'onde d'émission [nm]	355	532
Rayon télescope réception [cm]	36	
Energie émise [J/pulse]	0,050	0,100
Fréquence de répétition [Hz]	10	
Temps d'observation [min]	1	
Rendement quantique [-]	0,2	0,1
Rendement optique [-]	0,3	0,4
Résolution spatiale [m]	100	
Largeur de bande filtre [nm]	5	
Champ d'observation [mrad]	1	

Conclusion

Pour des lignes de bases observées pendant de courtes durées, la présence d'inhomogénéités atmosphériques limite la précision altimétrique obtenue par les stratégies actuelles de traitements et de correction du délai troposphérique. Un moyen de correction externe est donc nécessaire.

En théorie, un lidar Raman semble être la meilleure solution pour mesurer le profil de vapeur d'eau et corriger les mesures GPS du délai troposphérique humide.

En pratique, un prototype est en cours de développement en collaboration avec le Service d'Aéronomie du CNRS et devrait être testé durant la campagne ESCOMPTE en juin prochain.

Une intercomparaison de la mesure du contenu en vapeur d'eau avec les autres instruments de mesure présents sur le site (radiomètres, radiosondage, tomographie par GPS, modèles météorologiques) pourra alors être menée. L'apport du lidar Raman par rapport à ces instruments sera alors évalué. L'effet sur le positionnement par GPS sera quantifié.

Références

[ALBER et al 97] C. Alber, R. Ware, C. Rocken and F. Solheim : *GPS surveying with 1 mm precision using corrections for atmospheric slant path delay*, in Geophys. Res. Lett., 24, 1859-1862, 1997.

[ANSMANN et al 92] A. Ansmann, U. Wandiger, M. Riebesell, C. Weitkamp and W. Michaelis : *Independant meaurement of extinction backscatter profiles in cirrus clouds by using a combinend Raman elastic-backscatter lidar*, Apllied Optics, vol. 31, n° 33, 1992.

[BAR-SEVER et al 98] Y.E. Bar-Sever, P.M. Kroger and J.A. Borjesson : *Estimating horizontal gradients of tropospheric path delay with a single GPS receiver*, in J. Geophys. Res., 103, B3, 5019-5035, 1998.

[BOCK, DOERFLINGER 01] O. Bock and E. Doerflinger : *Atmospheric modeling in GPS data for high accuracy positioning, Physics and Chemistry of the Earth*, MS No.: C01, 2001.

[BOCK et al 01] O. Bock, J. Tarniewicz, C. Thom and J. Pelon : *Effect of Small-Scale Atmospheric Inhomogeneity on Positioning Accuracy with GPS*, in Geophys. Res. Lett., en relecture, 2001.

[DOBSON et al 96] J.L. Davis, G. Elgered, A.E. Niell and C.E. Kuehn : *Ground-based measurements of gradients in the wet radio refractive index of air,* Radio Sci., 28, 1003-1018, 1993.

[ICHIKAWA 95] Ichikawa : *Positioning error in GPS measurements due to atmospheric excess path delay estimated from three-dimensional numerical prediction model data,* in J.Geod. Soc. Japan, 42, 183-204, 1996.

[INABA76] Inaba : *Laser Monitoring of the Atmosphere,* Springer-Verlag Berlin Heideberg, New-York, 1976.

[LEMONE 76] MA. LeMone : *Modulation of turbulence energy by longitude rolls in an unstable boundary layer,* J. Atmos. Sci. 33, 1308-1320, 1976.

[LENSCHOW, STEPHEN 80] D.H. Lenschow and P.L. Stephen : *The role of thermals in the convective boundary layer,* Bound.-Layer Meteor., 19, 509-532, 1980.

[LiNDLOHR, WELLS 85] W. Lindlohr and D. Wells : *GPS design using undifferenced carrier beat phase observations,* in Manuscripta Geodatica, 10, 255-295, 1985.

[MELFI et al 69] S.H. Mefli, J.D. Lawrence, Jr. and M.P. McCormick : *Observation of Raman scattering by water vapor in the atmosphere,* in Applied Physics Letters, vol. 15, n° 9, 1969.

[PENNEY, LAPP 76] C. M. Penney and M. Lapp : *Raman-scattering cross sections for water vapor,* in J. Opt. Soc. Am. 66, 422-425.

[ROTHATCHER, MERVART 96] M. Rothacher and L. Mertvart (editors) : *Bernese GPS Software Version 4.0,* Astronomical Institute, Univ. Berne, 1996.

[SAASTAMOINEN 72] J. Saastamoinen : *Contributions to the theory of atmospheric refraction,* in Bull. Geod., 107, 13-34, 1973.

[SANTERRE 91] R. Santerre : *Impact of GPS satellite sky distribution,* in Manuscr. Geod., 16, 28-53, 1991.

[SHETTLE, FENN 79] E.P. Shettle and R.W. Fenn : *Models for the Aerosols of the Lower Atmosphere and the Effects on Humidity Variations on Their Optical Properties,* AFGL-TR-79-0214, in Environmental Research Papers, n° 676, 20 septembre 1979.

[STULL 88] R.B. Stull : *An Introduction to Boundary Layer Meteorology, Chap. 11 : Convective mixed layer,* (Atmospheric Sciences Library, Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands 1988).

[THAYER 74] G.D. Thayer : *An improved equation for the radio refractive index of air,* Radio Sci., vol. 9, pp. 803-807.

[WARE et al 93] R. Ware, C. Rocken, F. Solheim, T. Van Hove, C. Alber and J. Johnson : *Pointed water vapor radiometer corrections for accurate global positionning system surveying,* in Geophys. Res. Lett., 20, 2635-2638, 1993.

[WHITEMAN et al 92] D.N. Whiteman, S.H. Melfi and R. A. Ferrare : *Raman Lidar System for the Meaurement of Water Vapor and Aeorols in the Earth's Atmosphere,* in Applied Optics, vol. 31, n° 16, 1992.

Publications

[BOCK et al 01] O. Bock, J. Tarniewicz, C. Thom, J. Pelon and M. Kasser : *Study of external path delay correction techniques for high accuracy height determination with GPS, Physics and Chemistry of the Earth*, MS No. G4.3-0013, laboratoire OEMI, IGN-SR 01-001/L-COM-OB, 2001.

[BOCK et al 01] O. Bock, J. Tarniewicz, C. Thom and J. Pelon : *Effect of Small-Scale Atmospheric Inhomogeneity on Positioning Accuracy with GPS*, in Geophys. Res. Lett., laboratoire OEMI, IGN-SR 01-002/L-ART-OB, 2001 (en relecture).

B.5 Apport de l'information géographique dans l'analyse des risques. Application à l'étude des perturbations du réseau routier à la suite de catastrophes

Jean-François Gleyze

Contexte

À l'automne 1999, le laboratoire COGIT a lancé une nouvelle Action de recherche intitulée « Risques ». En complément des axes de recherche « traditionnels » consacrés à l'élaboration et à l'évolution des bases de données géographiques (généralisation, qualité, mise à jour, etc.), l'action de recherche « Risques » amorce un tournant vers la recherche applicative. En quoi les recherches en données géographiques peuvent-elles être utiles ? Quelles réponses le laboratoire COGIT peut-il apporter autour du domaine des risques, au-delà même de l'aspect purement applicatif ? La thématique choisie ne doit effectivement pas apparaître comme secondaire. Au demeurant, il est peu vraisemblable que ce soit le cas aujourd'hui, compte-tenu de la prise de conscience accrue des risques. L'importante médiatisation autour des catastrophes reflète et accentue ce souci, en même temps qu'elle définit un cadre très large à la notion de risque. Celle-ci ne se cantonne pas aux menaces naturelles que constituent les inondations, les tremblements de terre, les avalanches, les feux de forêt, les mouvements de terrain, les éruptions volcaniques, les cyclones et autres phénomènes atmosphériques.

Les dernières décennies ont vu, en effet, se dessiner l'ombre des risques d'autres natures, pour lesquels la liste des catastrophes survenues n'en finit pas de s'allonger, comme le démontrent tristement les quelques exemples suivants :

- risques écologiques : l'accident de l'Exxon Valdez (côtes de l'Alaska, 1989), l'assèchement de la mer d'Aral depuis les années 60, le trou de la couche d'ozone, l'effet de serre, etc… ;
- risques technologiques nucléaires : l'explosion de Tchernobyl (Ukraine, 1986), la fusion du réacteur de Three Miles Island (États-Unis, 1979) ;
- risques technologiques industriels : les nuages toxiques des usines de Seveso (Italie, 1976), de Bhopãl (Inde, 1984), l'explosion de la plate-forme pétrolière Piper Alpha (Mer du Nord, 1988) ;
- risques de transport civils : l'explosion en vol du Boeing de la TWA (côte-est des États-Unis, 1996), l'accident ferroviaire à Eschede (Allemagne, 1998) ;
- risques de transport de matières dangereuses (TMD) : l'accident de Los Alfaques (Espagne, 1978) provoquant le déversement de propylène à proximité d'un camping ;
- risques économiques : les krachs boursiers ;
- risques sanitaires : le sida, le paludisme, le virus Ebola, la maladie de Creutzfeldt-Jakob, etc.

Cette énumération est loin d'être exhaustive. Il faudrait, en particulier, lui ajouter les risques présents à plus petite échelle, comme par exemple : les risques techniques de réseaux ou l'insécurité - propres aux milieux urbains, ainsi que l'ensemble des risques domestiques. Cependant, cette ébauche de classification des risques ne met pas en valeur les différents aspects géographiques des risques et, pour le moins, ne distingue pas les risques pour lesquels la composante géographique est importante, sinon primordiale dans leur analyse.

Le travail de thèse de Jean-François Gleyze consistait, dans un premier temps, à faire un état de l'art sur la notion de risque en général [GLEYZE 00]. Le présent article s'inspire, pour une large part, de ce travail de synthèse. À ce titre, la première partie est consacrée à la définition du risque et de ses deux composantes aléa et vulnérabilité, tandis que la deuxième partie explore les pistes de recherche pertinentes dans le domaine de la géographie et des bases de données géographiques. La troisième et la dernière partie prolongent cette réflexion en présentant les orientations actuelles du travail de thèse en cours, autour notamment des études des relations et de la notion d'accessibilité sur un graphe dans le contexte de l'endommagement d'un réseau routier après une catastrophe.

La notion de risque

Généralités

Définitions

Le *Petit Robert* définit le risque comme un « danger éventuel plus ou moins prévisible ». Cette formulation met explicitement en avant le double aspect du risque, à savoir : le caractère aléatoire d'un événement assorti de la menace qu'il représente. De fait, il faut éviter de focaliser la notion de risque sur la seule gravité des accidents survenus : ce serait négliger la composante aléatoire des événements dont on peut dire d'emblée qu'elle est généralement (et heureusement) inversement proportionnelle aux dégâts causés.

Ceci conduit à considérer le risque sous un double aspect : risque = aléa + vulnérabilité :

- l'aléa correspond à la fréquence ou à la probabilité d'occurrence d'un événement d'intensité donnée ;
- la vulnérabilité représente la gravité des conséquences de l'événement sur l'ensemble des entités exposées (vies humaines, richesses, environnement).

La courbe de Farmer (figure B.5.1) représente la tendance générale existant entre les composantes aléa et vulnérabilité et permet de mettre en évidence trois domaines de risques, dont notamment le risque majeur, caractérisé conjointement par une faible probabilité d'occurrence et une énorme gravité en nombre de victimes ou en dommages.

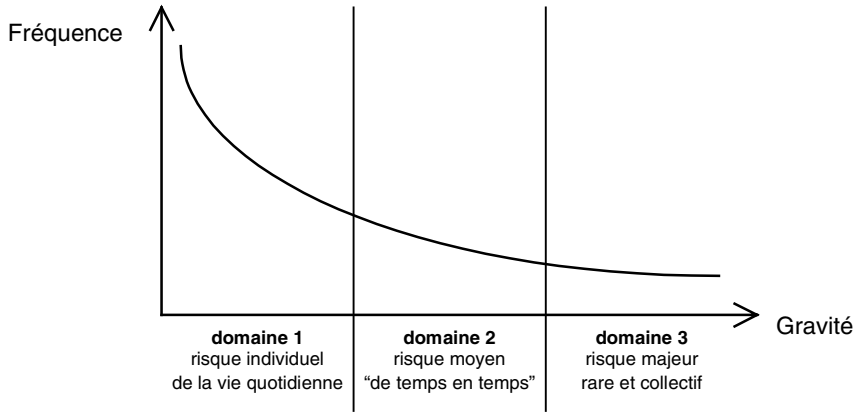


***figure B.5.1** : courbe de Farmer (source :* [GLATRON 97])

Le vocabulaire associé à la notion de risque est issu du langage courant et prête souvent à confusion. En l'occurrence, il ne fait pas l'objet d'un consensus, au point que les notions mêmes d'aléa et de vulnérabilité nécessitent d'être redéfinies dans le contexte de chaque étude. [GLEYZE 00] recadre dans le tableau B.5.1 les termes les plus fréquents employés dans le domaine du risque.

***tableau B.5.1** : quelques définitions autour des termes « risque » et « catastrophe »*

Risque Définition qualitative	=	*Danger**	Menace de la sûreté ou de l'existence d'entités présentes au sol ; source de l'accident potentiel.	+	*Enjeux*	Personnes, biens, activités, moyens, patrimoine, etc,… susceptibles d'être affectés par la réalisation du phénomène redouté.
Risque Définition quantitative	=	*Aléa*	Incertitude sur la réalisation d'un phénomène donné. En général, l'aléa est décrit par la probabilité d'occurrence et l'intensité du phénomène.	+	*Vulnérabilité*	Niveau de conséquences prévisibles (ou gravité) du phénomène sur les entités menacées.
Catastrophe Réalisation du risque	=	*Accident*	Réalisation de l'incertitude liée à l'aléa, "danger avéré".	+	*Dommages*	Dégâts, perturbations et préjudices constatés à la suite de l'accident.

(*) contrairement au risque lui-même, le danger existe indépendamment de la présence d'unités vulnérables au sol. Il est uniquement dû à la présence d'un aléa, car il est inhérent aux effets catastrophiques du phénomène (le danger de noyade est inhérent aux inondations et aux raz-de-marée, celui d'ensevelissement aux avalanches, etc).

Les différents types d'actions pour diminuer le risque

Si tant est que « le risque nul n'existe pas », il existe toutefois plusieurs manières de le diminuer afin de préserver les populations et les milieux.

À ce titre, il est d'usage de distinguer trois grands types d'actions :

- la prévention du risque : elle englobe les actions et mesures tendant à empêcher la réalisation du risque. Par inférence de la décomposition du risque en aléa + vulnérabilité, la prévention consiste à diminuer la probabilité d'occurrence de l'événement considéré ou à mettre en place des systèmes visant à en réduire les conséquences. Il s'agit d'un travail à long terme ;
- la prévision du risque tente d'anticiper la réalisation effective du risque par des procédés scientifiques, afin d'en optimiser la gestion - avant, pendant et après la crise. Il s'agit d'un travail à court terme ;

- la culture du risque (ou l'éducation du risque) vise à favoriser la prise de conscience du risque par les populations, notamment lorsque la crise survient.

Les domaines d'étude

Ces différents aspects de la connaissance et de la prise en compte des risques s'articulent autour de domaines variés et de fait, l'étude de risques nécessite bien souvent la concertation d'experts d'horizons très différents. [GENDREAU, LANG 99] précisent, à ce titre, les différents points de vue sous lesquels la notion de « risque » peut être abordée :

- l'approche scientifique s'attache à estimer et évaluer le risque. Il s'agit d'identifier les facteurs explicatifs de l'événement, de mesurer leur probabilité d'occurrence et leur magnitude. Les estimations peuvent provenir de constatations empiriques ou de modèles issus de relations causales supposées. Les applications de ces recherches s'inscrivent dans les volets « prévention » et « prévision » du risque ;

- l'approche sociétale étudie la construction de la perception sociale du risque, elle évalue l'acceptabilité individuelle et sociale du risque. En ce sens, elle est directement rattachée à l'aspect « culture du risque » ;

- l'approche politico-administrative vise, d'une part, à mettre en place des actions publiques spécifiques en faveur de la prévention du risque, d'autre part, à enclencher des processus de décision adaptés en gestion de crise. Ces deux niveaux d'intervention impliquent différents acteurs, institutions et procédures qui font appel à des organisations particulières ;

- l'approche judiciaire s'efforce enfin d'imputer au mieux les responsabilités dans la gestion du risque, mais aussi d'évaluer rétrospectivement l'action publique à travers les différents acteurs extérieurs (média, juges, victimes et experts). Dans ce domaine, la tendance actuelle consiste à assimiler une mort évitable à un crime.

Proposition de classification des risques

Afin de clore ce premier tour d'horizon autour de la notion de « risque », nous avons tenté d'élaborer une classification des risques susceptibles de menacer une population à plus ou moins grande échelle. Ce choix exclut d'emblée les risques individuels (risques domestiques, risques de la route, etc…). Par ailleurs, à l'instar des assurances, nous avons également choisi d'écarter les risques inhérents aux guerres. De cette manière, notre vision rejoint en partie celle du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, qui distingue les « risques de la vie quotidienne » et les « risques liés aux conflits » des trois grands types de risques majeurs que sont les risques naturels, les risques technologiques et les risques de transport collectif. Le tableau B.5.2 résume en quatre catégories la classification adoptée, réalisée notamment en préjugeant des types d'analyses associés [GLEYZE 00].

tableau B.5.2 *: proposition de classification des risques*

		Risques
Risques naturels		Inondations
		Feux de forêt
		Mouvements de terrain
		Avalanches
		Séïsmes
		Volcans
		Cyclones, tempêtes
Risques technologiques		Risques industriels
		Ruptures de barrage
		Risques de transports de matières dangereuses
		Risques nucléaires
Risques urbains	Risques bâtimentaires	Menace de ruines
		Risques diffus (chantiers, matériaux…)
	Risques de réseaux	Gaz, électricité, eau
		Transports
	Risques de société	Menaces pour la tranquillité publique, la sécurité des personnes
		Menaces pour la sécurité des biens
		Risques diffus (manifestations, fêtes…)
		Conflits, attentats
		Pollutions, toxicité

Risques sanitaires et environnementaux	Insalubrité, épidémies, maladies
	Risques alimentaires

Notons enfin qu'il est également courant de faire tout simplement la part des risques naturels et des risques « anthropiques », c'est-à-dire liés aux milieux peuplés ou à l'activité humaine (ils correspondent aux trois dernières grandes catégories du tableau B.5.2).

La composante aléa : traitement des incertitudes et aspects probabilistes des risques

Définition

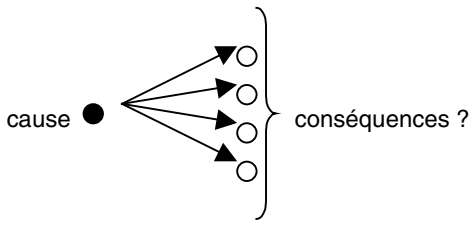
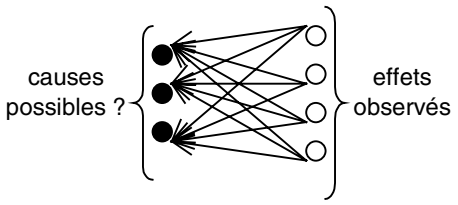
Ainsi que nous l'avons vu plus haut, l'aléa correspond à l'incertitude sur le déroulement (moment, circonstances) et la probabilité d'un phénomène catastrophique donné. En l'occurrence, il existe deux manières d'aborder la quantification des incertitudes dans le domaine des risques :

- par une interprétation fréquentiste du risque : la probabilité de survenue d'un événement est estimée par sa fréquence empirique d'occurrence ⇒ il s'agit d'un schéma de logique déductive ;
- par une interprétation subjective des probabilités : à partir des effets observés, il s'agit de déterminer la probabilité de chacune des causes envisageables, pondérées par la crédibilité qui leur est accordée ⇒ il s'agit d'un schéma de logique inductive.

Le tableau B.5.3 retrace les grandes lignes de ces deux courants.

tableau B.5.3

Principes des deux logiques de traitement des incertitudes dans l'étude de risques (source : [MUNIER 99]).

	Logique déductive	**Logique inductive**
Schéma de raisonnement		
Principes Mathématiques associés	Loi des grands nombres : $P\left[\frac{\text{conséquence B}}{\text{cause A}}\right] \approx \frac{card\left\{\begin{array}{c}\text{conséquence B}\\ \text{\& cause A}\end{array}\right\}}{card\{\text{cause A}\}}$	Formule de Bayes : $\underbrace{P\left[\frac{\text{cause A}}{\text{conséquence B}}\right]}_{\substack{\text{mise à jour du savoir,}\\ \text{loi a posteriori}\\ \text{= posteriori}}} \propto \underbrace{P\left[\frac{\text{conséquence B}}{\text{cause A}}\right]}_{\substack{\text{modèle, "rouages":}\\ \text{"comment ça marche"}\\ \text{= vraisemblance}}} \times \underbrace{P[\text{cause A}]}_{\substack{\text{degré de croyance}\\ \text{indépendant des observations,}\\ \text{expertise}\\ \text{= prior}}}$ Formule de marginalisation : $\underbrace{P(A/H) = \sum_i P(A \cap C_i / H)}_{\substack{\{C_i\}=\text{partition de E}\\ \text{l'incertitude sur } A \text{ sachant l'hypothèse } H\\ \text{se décompose en l'incertitude sur } A \text{ sachant } H\\ \text{pour chacun des modèles } C_i \text{ envisageables}}}$

Ces deux modes de raisonnement se retrouvent explicitement dans les modélisations d'accidents de systèmes arborescents (très fréquentes pour étudier les processus industriels). Le principe de base repose sur le *théorème de Lusser* selon lequel « la probabilité de succès d'une chaîne de composants est égale au produit des probabilités de succès pour chacun de ses éléments ».

Ainsi, dans le cas de systèmes simples à décomposer, il est courant d'utiliser, entre autres, la méthode des arbres consistant à étudier la succession de séquences d'actions sous forme arborescente déductive (arbres des défaillances ou des défauts) ou inductive (arbres d'événements). Cette manière de procéder permet en outre d'identifier aisément les dangers en phase finale ou intermédiaire.

Lorsque le phénomène est trop complexe à décomposer, l'évaluation quantitative du fonctionnement du système se fait par des méthodes stochastiques : modélisations des phénomènes à partir de résultats mathématiques (approche déterministe) et d'observations empiriques (approche probabiliste), simulations de Monte-Carlo, etc. Il s'agit bien souvent

d'une démarche inductive dans laquelle le problème consiste à remonter aux causes cachées à partir d'une base de données [LEROY, SIGNORET 92].

Les méthodes formelles décrites, en premier lieu, sont utilisées dans les études de risques industriels, tels que les processus de la filière agroalimentaire, des industries chimiques, du nucléaire, etc. En ce sens, on pourrait regrouper les risques concernés sous le terme générique de risques technologiques, pour lesquels on traite essentiellement des données de fiabilité (données relatives au mauvais fonctionnement d'un équipement ou d'un opérateur, autrement dit données microscopiques correspondant à des événements individualisés).

Les méthodes stochastiques s'apparentent, pour leur part, aux problèmes de risques faisant intervenir un grand nombre d'événements dont la survenance pose des problèmes de quantification. Il s'agit bien évidemment des risques naturels (pluies, crues, feux de forêt, avalanches, cyclones, séismes) mais aussi de risques liés à l'activité humaine et aux populations, tels que les transports de matière dangereuse ou les risques épidémiologiques.

Ces menaces sont alors soumises aux données événementielles (données macroscopiques correspondant à des successions d'événements ne pouvant être quantifiés individuellement : par exemple, le naufrage d'un pétrolier au large d'une côte donnée). Ce type de démarche met en relief l'importance des paramètres susceptibles d'intervenir dans le déclenchement des phénomènes et leurs problèmes d'intégration dans les modèles de risques sous-jacents.

L'évaluation pratique de l'aléa

Dans l'analyse de risques, la définition choisie pour l'aléa dans le contexte du risque étudié guide pour beaucoup la manière dont les aspects probabilistes du risque seront traités.

L'aléa peut être abordé de manière brute, selon sa définition première - la probabilité d'occurrence d'un événement donné. C'est notamment le cas pour les études de risque où l'événement est quantifié de manière simple (par exemple : le débit d'une rivière). Il est alors plus commode d'exprimer l'aléa en période de retour.

Il peut arriver que le phénomène considéré ne relève pas de connaissances physiques ni de modélisations bien « rodées ». Dans ce cas, l'analyse de l'aléa est descriptive et s'exprime comme une simple fréquence empirique des accidents constatés à partir de fichiers d'archives (par exemple : les risques urbains d'accident ou de délinquance).

Lorsque l'ampleur de l'événement est très fluctuante aléatoirement et spatialement, l'aléa peut intégrer à la fois les valeurs de fréquence et d'intensité du phénomène. Les méthodes d'estimation de l'aléa s'apparentent souvent à des classifications spatiales selon plusieurs paramètres. Il peut s'agir d'un simple travail de zonage permettant de localiser des menaces sur une région (par exemple les risques naturels visant des peuplements forestiers) ou d'une vision de la zone, un cliché de la situation fluctuant avec les paramètres (de ce fait, ce type d'étude est avantageux pour les problèmes d'aménagement - par exemple pour les forêts menacées par des incendies).

Un autre mode de représentation cartographique peut intégrer fréquence et intensité de l'aléa en faisant apparaître les différentes emprises des phénomènes selon leur fréquence d'occurrence. Cette approche, utilisée dans la méthode Inondabilité du CEMAGREF (Centre d'Etudes du Machinisme Agricole et du Génie Rural des Eaux et Forêts) [GENDREAU, LANG 99], est bien adaptée pour être confrontée à la carte de la vulnérabilité dans une perspective décisionnelle.

Enfin, lorsque l'étude du risque s'articule autour de son volet « prévision », l'aléa peut être présenté comme la conjoncture entre l'existant (par exemple le terrain et ses caractéristiques pour un risque naturel) et les phénomènes aléatoires (par exemple : des intempéries pluvieuses ou neigeuses) observés en temps réel ou prévus à court terme.

Si la notion d'aléa est assez bien définie, il n'en demeure donc pas moins que la multiplicité des techniques, la diversité des exemples étudiés et la perspective d'approche du risque font de l'analyse de l'aléa une étude au cas par cas.

Il est enfin important de rappeler que l'aléa ne représente pas à lui seul le risque. Par exemple, une simple cartographie de l'aléa ne suffit pas à quantifier le risque, contrairement à l'usage répandu consistant à dessiner les contours d'une crue exceptionnelle en guise de carte de risque d'inondations. L'analyse de l'aléa d'un risque ne doit pas conduire à l'élaboration de résultats d'ordre uniquement documentaire, dessaisis de l'analyse de vulnérabilité ….

La composante vulnérabilité : aspects déterministes des risques

Définition

Dans les études de risques, il n'est pas rare de constater que le terme de « vulnérabilité » corresponde tantôt à une mesure de l'endommagement ou du préjudice potentiel des entités menacées par une catastrophe, tantôt à un facteur aggravant de l'aléa comme une mesure de la propension à être endommagé.

Si l'on prend l'exemple d'un bâtiment menacé par le risque d'incendie, la vulnérabilité correspondrait, selon l'acception choisie, à la valeur marchande du bâtiment ou à son degré d'inflammabilité étant tenu compte des matériaux qui le constituent. Étant donné que cette deuxième acception entre intégralement dans la composante aléa du risque, nous choisissons de définir de manière univoque la vulnérabilité comme le niveau de conséquences prévisibles d'un phénomène naturel, technologique, urbain, sanitaire ou environnemental sur des enjeux humains, économiques et environnementaux.

Formellement, la vulnérabilité est une variable exprimant les impacts d'un phénomène potentiel en fonction [TORTEROTOT 93] :

- des paramètres physiques de l'aléa : amplitude, durée, étendue, rapidité, etc ;
- des ressources disponibles pour limiter les impacts : délais de réponse des autorités locales et des populations, capacité et moyens pour se protéger et restaurer ;
- et bien sûr du descriptif de tous les enjeux présents au sol : quantité et nature des biens, occupation du sol, activité, localisation et surface (à ce titre, on peut parler d' « occupation du sol » au sens large, c'est-à-dire en distinguant toutes les manières dont le sol est exploité : milieux naturels, cultures, bâti, infrastructures, etc).

Idéalement, cette démarche est déterministe car, à aucun moment, elle ne prend en compte la probabilité de survenance de l'événement redouté. Cette intégration de l'aléa à la vulnérabilité constitue une étape ultérieure de la mesure du risque. Par expérience, on a facilement tendance à confondre les notions d'enjeux et de dommages lorsque l'on parle de vulnérabilité. Ainsi, lorsqu'il s'agit de mesurer une vulnérabilité, le vocabulaire employé est très varié : on parle tantôt d'élément vulnérable, de dommage ou d'impact potentiel, d'enjeu menacé ou exposé, etc.

À ce titre, il faut bien noter qu'il existe deux démarches pour mesurer la vulnérabilité et autant de vocabulaires associés [CHALINE, DUBOIS-MAURY 94] :

- la démarche factuelle : elle est une mesure *a posteriori* de la vulnérabilité, exploitant les données des services de secours (lieux d'occurrence, montant des dommages directs et immédiats) ;
- la démarche prospective : cette mesure est fondée sur l'étude *a priori* des sources de danger et des facteurs démultipliant les risques et les enjeux (densité, morphologie urbaine, etc).

Rappelons à nouveau que l'aspect aléatoire du phénomène est théoriquement absent dans l'analyse de la vulnérabilité : de fait, le phénomène considéré - même s'il est « physiquement » bien caractérisé - est un scénario dont la réalisation n'entre pas en ligne de jeu. Ainsi, les termes employés dans la mesure de la vulnérabilité dépendent du point de vue adopté par l'analyste, selon qu'il emploie une méthode factuelle, prospective ou hybride. Cet aspect sémantique de l'analyse de vulnérabilité est uniquement méthodologique et renseigne implicitement sur les hypothèses du modèle utilisé. Pour notre part, nous aborderons la notion de vulnérabilité comme une représentation des dommages potentiels, ce qui, par abus de langage, nous conduira indifféremment à parler de vulnérabilité ou de dommages.

La classification des dommages

Dommages tangibles / intangibles

Une première classification des dommages consiste à distinguer les dommages tangibles des dommages intangibles. Les dommages tangibles concernent l'ensemble des dommages directement chiffrables : il s'agit classiquement des dégâts matériels sur des biens et activités (publics ou privés) dont la valeur est connue ou facilement évaluable par expertise.

À l'opposé, on trouve parmi les dommages intangibles [TORTEROTOT 93] :

- les pertes en vies humaines ;
- tous les problèmes de santé à court et moyen terme, l'angoisse face à l'événement, le stress et ses conséquences, l'inquiétude persistante face au risque encouru ;
- la rupture de mode de vie et du tissu social ainsi que l'isolement ;
- la perte de biens privés irremplaçables ;
- les dommages au patrimoine historique et culturel.

Dommages directs / indirects

L'enchaînement entre l'effet (le phénomène) et ses conséquences (l'impact) établit un autre niveau de comparaison parmi les dommages potentiels en distinguant dommages directs et dommages indirects.

Les dommages directs concernent les dégâts et perturbations sur les biens meubles et immeubles, les stocks, les infrastructures, routes, ouvrages et réseaux divers, imputables directement à l'action du phénomène. Il n'est pas déraisonnable d'y adjoindre les atteintes aux ressources naturelles dont les coûts de dépollution sont souvent bien connus par retour d'expérience. Les dommages indirects correspondent aux dégâts et perturbations engendrées par le

phénomène par l'intermédiaire des dommages directs. Il s'agit de toutes les difficultés de fonctionnement, d'échanges et de communications induites : arrêts d'activités et de services entraînant des pertes d'exploitation, ruptures de circuits économiques, perturbations des réseaux, etc. On distingue, en outre, les impacts indirects « primaires » survenant dans la zone où le phénomène s'est produit des impacts indirects « secondaires » se manifestant à l'extérieur de la même zone [TORTEROTOT 93].

Dommages/nuisances

On peut enfin effectuer une dernière distinction parmi les impacts d'un phénomène et nuancer la notion de « dommages » en introduisant celle de « nuisances » [ENVIRONNEMENT 80].

Les dommages regroupent l'ensemble des dégâts de toutes sortes, constatés à plus ou moins court terme à la suite d'un accident réalisé.

Les nuisances concernent non seulement de tels dommages, mais également l'ensemble des modifications de fonctionnement des populations et des sols dues à la seule existence de l'éventualité d'un phénomène dangereux (indépendamment donc de l'action effective de ce phénomène). Citons, pour exemple, l'impact psychologique de la menace d'une crue sur les populations riveraines, la restriction d'usage des sols due aux règlementations, les mesures de prévention et de protection économiquement neutres (c'est-à-dire sans valeur ajoutée), etc.

Ces différentes distinctions permettent, par le jeu d'hypothèses, de bien définir *a priori* les dommages qui seront pris en compte dans la quantification des niveaux de vulnérabilité, étant bien entendu qu'une évaluation exhaustive de la vulnérabilité intégrant dommages et nuisances directs, indirects, tangibles et intangibles est irréaliste.

À cette typologie des dommages, particulièrement adaptée aux approches économique et organisationnelle de la vulnérabilité, se superpose un mode de classification par enjeux. Celui-ci consiste plus naturellement à identifier les dommages en fonction des entités menacées par le phénomène et de ce fait, s'apparente plus aux aspects préventifs de l'analyse de vulnérabilité.

La classification des enjeux

Il est d'usage de distinguer trois grands types d'enjeux : l'être humain, l'ensemble écosystème-environnement et les richesses économiques [GLEYZE 00].

L'être humain

À défaut d'une quantification économique, les dommages sur les populations se mesurent habituellement en nombre de blessés et de morts. Dans le triste décompte des victimes, certaines précisions sont souvent de mise : distinction entre les personnes présentes à la source du risque et les personnes « extérieures » touchées par effet induit, prise en compte d'un temps de latence dans la manifestation des effets néfastes, etc. L'incertitude sur un bilan humain est proportionnelle au nombre de victimes et concerne les personnes blessées pour lesquelles l'apparition de séquelles reste hypothétique dans les faits et dans le temps. Les statistiques d'anticipation du nombre de victimes pour un risque donné (probabilité d'aléa) s'expriment classiquement sous la forme d'un nombre de décès par an et par million d'habitants, sans distinction des tranches de population concernées.

L'écosystème et l'environnement

Les dommages infligés à l'écosystème et à l'environnement correspondent à des pollutions accidentelles ou chroniques et à leurs effets induits. De fait, les dommages se chiffrent par le montant de lutte contre la pollution, de réhabilitation de sites, de remise en état d'installations, mais aussi par les manques à gagner et les pertes d'investissement. Un flou demeure cependant autour des dommages intangibles (perte de jouissance, dégradation du patrimoine, etc.).

Les richesses économiques et les infrastructures

La quantification des dommages potentiels consiste à évaluer la masse de richesses exposées. Partant de la connaissance de l'occupation des sols et des coûts unitaires pour chaque type d'occupation des sols, le montant recherché correspond à la quantité :

Volumes	×	Valeurs unitaires
habitations, emplois, équipements, etc.		

Qu'il s'agisse, entre autres, d'établissements à caractère économique ou administratif ou d'infrastructures, la vulnérabilité se cantonne généralement aux dommages structurels potentiels et laisse de côté les perturbations induites, souvent dues à l'existence de réseaux rendant les systèmes interdépendants. Cet état de fait est regrettable, car le montant des effets indirects peut être tout à fait comparable à celui des effets directs.

L'évaluation pratique de la vulnérabilité

Ces quelques considérations laissent deviner combien les dommages les plus faciles à évaluer sont les dommages tangibles directs, car il est facile, pour eux, d'avancer une valeur économique. À l'opposé, les dommages intangibles (dégradations de paysage, dommages irréparables au patrimoine historique…) et les dommages indirects (perturbations routières, ruptures d'activité…) sont difficiles à identifier précisément, à quantifier et même à comparer proportionnellement à l'ensemble des dégâts.

En pratique, pour une grande majorité des études de risques - qu'il s'agisse d'enjeux humains, environnementaux ou économiques - la quantification de la vulnérabilité est réalisée de manière partielle par la création de classes (par exemple, répartitions en zones vulnérables faibles / moyennes / fortes). Les méthodes de classification vont des simples outils descriptifs (par exemple, vulnérabilité humaine échelonnée par les valeurs de densité humaine) à des techniques plus poussées de statistiques spatiales (classification automatique hiérarchique, etc.).

Lorsque le risque est appréhendé sous ses aspects économiques, la vulnérabilité est explicitement exprimée sous forme de coûts. Ainsi, la majorité des études relatives aux risques d'inondation se fondent sur les retours d'expérience et associent à chacune des crues passées une description économique détaillée des dommages déplorés.

Dans le domaine assurantiel, il arrive que la vulnérabilité soit mesurée par un degré d'endommagement compris entre 0 et 1, et qui, appliqué à la valeur de l'unité, permet d'obtenir une estimation du montant des pertes affectées. L'évaluation exclusive des dommages et préjudices sous forme d'un montant économique a, par ailleurs, amené de nombreux pays et organismes à attribuer aux bilans en blessés et en morts des montants chiffrés… De manière générale, les évaluations économiques de dommages sont ajustées sur un ensemble de valeurs de référence, étalonnées par l'expérience et formalisées sous forme de fonctions ou de tableaux d'endommagement.

La détermination du niveau de risque : la synthèse aléa × vulnérabilité

À l'issue des étapes d'identification du risque et de l'analyse de l'aléa et de la vulnérabilité, l'expert dispose de tous les éléments pour déterminer les niveaux de risque. Bien évidemment, ce travail dépend du mode de représentation des deux composantes aléa et vulnérabilité, multipliant ainsi le nombre de façons d'appréhender le risque, comme nous allons le voir dans les lignes qui suivent.

Dans la plupart des études de risques, en particulier celles menées dans des objectifs de prévention, le risque se présente comme un « simple » croisement de l'aléa et de la vulnérabilité. L'aléa représentant la probabilité d'occurrence d'un événement donné et la vulnérabilité chiffrant le montant des dommages consécutifs à ce même événement, le risque se définit logiquement comme l'espérance des dommages déplorés suite à l'événement considéré, selon la formule :

Risque	=	aléa	x	vulnérabilité
		probabilité d'occurrence du phénomène		dommages consécutifs à la réalisation du phénomène

Dans de nombreuses études, l'analyse de l'aléa et, à plus forte raison, l'analyse de la vulnérabilité ont souvent conduit à quantifier aléa et vulnérabilité en les rangeant en « classes » ou « niveaux » (faible / moyen / fort / etc…), pour deux raisons principales :

- les techniques d'évaluation ne permettent pas une précision suffisante tant pour le niveau d'aléa (estimation incertaine d'une probabilité) que pour le niveau de vulnérabilité (difficulté de chiffrage exhaustif des dommages déplorés) ;
- la représentation des valeurs d'aléa, de vulnérabilité et, à terme, de risque demande à être simplifiée en vue de constituer un document d'aide à la décision, lisible par toutes les parties prenantes.

De ce fait, la notion de risque comme « espérance des dommages » est simplifiée par l'usage d'un tableau quantifiant les niveaux de risque en fonction des niveaux d'aléa et de vulnérabilité : il s'agit de la clé de détermination du risque. Le tableau B.5.4 (page suivante) est un exemple de clé de détermination à trois niveaux pour l'aléa, la vulnérabilité et le risque (faible / moyen / fort).

Dans le cadre des analyses de risque principalement envisagées sous les aspects économiques, la synthèse de l'aléa et de la vulnérabilité est parfois réalisée au travers de la notion de « Coût Moyen Annuel » (CMA). Cet indicateur

correspond à l'espérance mathématique de la fonction des dommages dont le caractère aléatoire est traduit par la probabilité d'occurrence du phénomène considéré [TORTEROTOT 93].

En d'autres termes, le risque est résumé sous forme d'une courbe mettant en relation la fréquence de l'événement en abscisse aux coûts des nuisances en ordonnée. Ce procédé permet notamment d'évaluer l'impact de mesures structurelles ou préventives par comparaison des courbes de CMA estimées.

Si ce type d'analyse économique exclut généralement toute considération géographique du phénomène étudié, il en est tout autrement des principes d'agrégation des niveaux d'aléa et de vulnérabilité par produit ou par clé de détermination. Le phénomène dangereux considéré possède en effet une étendue spatiale sur laquelle les niveaux d'aléa, d'une part, et de vulnérabilité, d'autre part, risquent fort de varier : le croisement des deux composantes nécessitera ainsi de discriminer plusieurs niveaux de risque selon la localisation spatiale et conformément à la règle de détermination adoptée. Les problématiques de zonage introduisent ainsi de plain pied la géographie dans le domaine des risques.

tableau B.5.4 *: exemple de clé de détermination du risque à trois niveaux*

	Vulnérabilité forte	**Vulnérabilité moyenne**	**Vulnérabilité faible**
Aléa fort	Risque fort	Risque fort	Risque moyen
Aléa moyen	Risque fort	Risque moyen	Risque moyen
Aléa faible	Risque moyen	Risque moyen	Risque faible

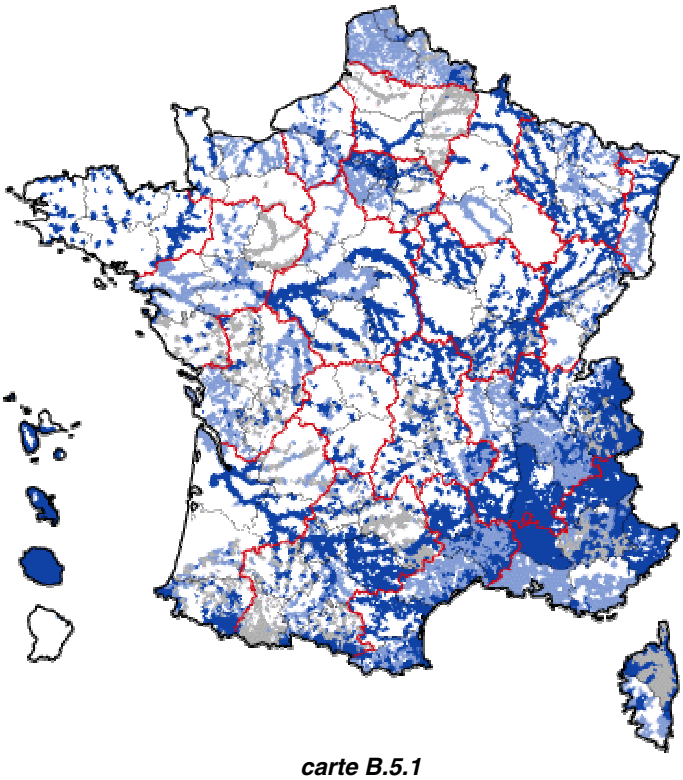
Les enjeux de la géographie dans le domaine du risque

L'outil cartographique à l'appui de l'analyse des risques et de la prise de décision

La composante spatiale des risques intervient, en premier lieu, d'un point de vue descriptif. Cette application de la géographie au domaine des risques est conséquente : la cartographie intervient en effet à tous les niveaux d'analyse du risque (identification, information, règlementations, prescriptions, etc.) et ce, à tous les échelons (de la parcelle au niveau national). À ce titre, les recherches en cartographie des risques ont été initiées au laboratoire COGIT au cours de l'été 2000 par une étude sur la représentation spatiale des accidents routiers [DOLLÉ 00].

Le support cartographique permet de transcrire les effets et conséquences des phénomènes redoutés. Sa mission d'information peut se borner à un simple recensement des zones à risque, en nuançant quelque peu le niveau d'intensité des phénomènes ou les enjeux en présence, à l'image des cartes de localisation des communes soumises aux risques naturels, diffusées par le MATE (Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement).

La carte B.5.1 constitue un exemple pour les risques d'inondation. Les niveaux croissants de gris et bleu sont représentatifs de l'importance des enjeux relevés.



carte B.5.1

Carte de localisation des communes soumises au risque d'inondation (source : site internet du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement : http://www.environnement.gouv.fr).

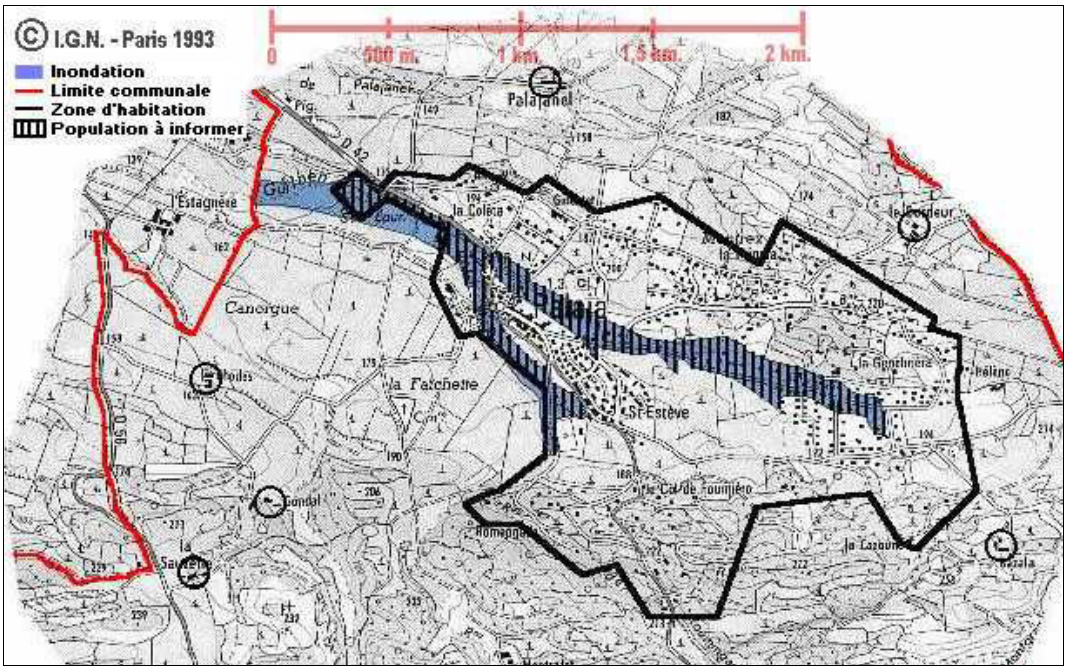
La cartographie du risque ou de l'une de ses composantes à plus grande échelle, nécessite de disposer d'une information plus précise, par exemple, en exploitant exhaustivement les archives historiques en matière d'aléa et en déclinant la nature des enjeux relevés en matière de vulnérabilité. Par ailleurs, la légende devra être définie avec le plus grand soin, car la carte d'information du risque est avant tout destinée au grand public. La carte B.5.2 (page suivante) est un exemple de carte d'aléa réalisée à partir d'un fond cartographique IGN.

La cartographie peut également constituer un trait d'union entre l'expert et le chercheur en tant qu'outil d'aide à la décision, pour l'élaboration de règlementations, recommandations ou prescriptions [GIVONE 98].

L'élaboration de cartes règlementaires est considérablement contrainte par l'échelle d'étude (la carte doit pouvoir être confrontée aux documents d'urbanisme), la connaissance très précise des aléas (elle-même soumise aux coûts des travaux d'expertise) et les difficultés évidentes d'évaluation de la vulnérabilité.

L'apport du document cartographique aux missions d'aménagement du territoire ne se cantonne pas seulement à la politique de gestion des risques. Le développement des systèmes d'informations géographiques et des outils de navigation embarquée étendent aujourd'hui le rôle de la carte aux missions d'alerte et d'organisation des secours en temps réel. Bien souvent, les acteurs ne disposent pas de la bonne carte au bon moment (« trop de cartes tue la carte »). L'usage de cartes ne peut supplanter la démarche de gestion des risques et d'aménagement : elle est là pour l'appuyer.

Par ailleurs, il est bien entendu, qu'une simple cartographie de l'aléa ne suffit pas à quantifier le risque : c'est hélas ce qui se passe lorsque les aménageurs et décideurs ne disposent que d'un zonage de l'aléa après une inondation, sous la forme d'une étendue de la zone inondée.



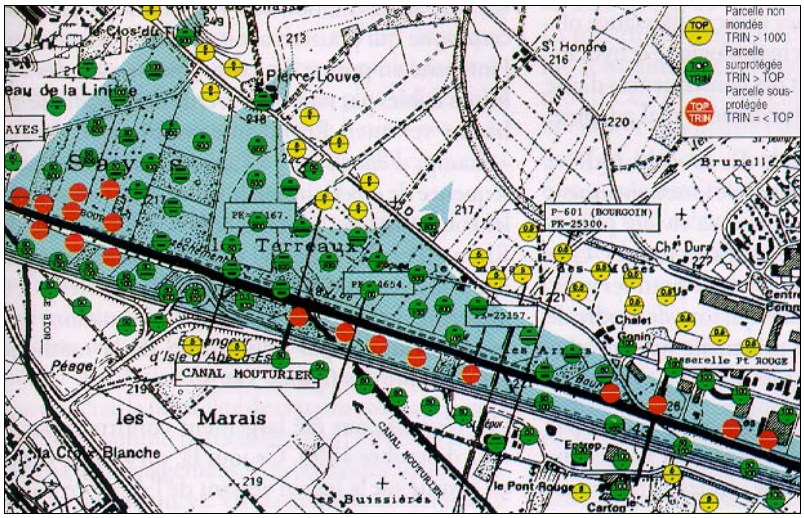
carte B.5.2 *: zonage de l'aléa d'inondations dans la commune de Palaja dans l'Aude (source : site internet du dossier départemental des risques majeurs dans l'Aude : http://www.aude.pref.gouv.fr/ddrm/@Aude00.htm)*

En réalité, les méthodes globales de gestion des risques naturels quantifiant et croisant aléa et vulnérabilité sont très rares. Citons, pour exemple, la méthode Inondabilité du CEMAGREF, dont l'originalité réside dans le choix de représenter aléa et vulnérabilité au risque d'inondations selon la même unité [GENDREAU, LANG 99]. Tandis que l'aléa correspond naturellement à la période de retour de l'inondation sur l'ensemble des parcelles, la vulnérabilité s'exprime, pour sa part, comme la période de retour acceptable, compte-tenu de l'occupation des sols de chacune des parcelles.

La comparaison des deux niveaux ainsi établis permet de mettre en évidence les zones sous-protégées (en rouge sur l'exemple fourni par la carte B.5.3, page suivante), les zones sur-protégées (en vert) ainsi que les zones non inondées par la crue maximale envisagée (en jaune).

Cet exemple met cependant en relief la difficulté pour le document cartographique de prendre en compte l'ensemble de tous les scénarios envisageables pour le phénomène ou des différentes répartitions possibles de la vulnérabilité sur la zone d'étude. En l'occurrence, une carte du type de celle issue de la méthode Inondabilité doit reposer à la fois sur des seuils prédéfinis de risque acceptable et des crues de référence dont on détermine leur délimitation spatiale, aboutissant ainsi à une représentation figée du risque d'inondation.

Á l'opposé, une méthode du type CMA est capable d'intégrer conjointement la variété des phénomènes selon leur période de retour et leurs conséquences dommageables, permettant par là de juger de la sensibilité de la zone et de ses aménagements au risque d'inondation. Au demeurant, une telle méthode présente le défaut de ne pas admettre de support cartographique, et pour cause : l'information spatiale est préalablement agrégée à la région d'étude.



carte B.5.3 *: exemple de zonage issu de la méthode Inondabilité*

(source : site internet du CEMAGREF de Lyon - présentation de la méthode Inondabilité : http://wwwhh.lyon.cemagref.fr/public/presentations/Inondafr/)

La modélisation géographique des risques

Les problèmes soulevés par les risques dans le domaine de la géographie ne relèvent pas uniquement de la représentation cartographique et des méthodes de visualisation. La connaissance précise des mécanismes induits par la menace d'une catastrophe sur une zone donnée nécessite souvent d'intégrer la dimension spatiale ou géographique à la description des phénomènes et, de manière plus pratique, aux modèles de calcul.

En l'occurrence, les choix auxquels est confronté l'analyste sont bien représentatifs des questions que se pose fréquemment le géographe. Ainsi en est-il du choix à opérer entre les représentations raster et vecteur. Par exemple, l'étude du fonctionnement d'un système hydrographique à l'échelle du bassin versant pour l'évaluation de l'impact des aménagements sur un écosystème nécessite de superposer des données de nature très différente : données topographiques, climatologiques, socio-économiques, etc.

À cet effet, le découpage de la zone en une maille régulière présente l'avantage de manier des secteurs unitaires, adaptés à la compréhension et à la planification globale de l'hydrosystème. En revanche, à l'opposé de la modélisation vecteur, ce procédé ne permet pas de prendre explicitement en compte la topologie et le fonctionnement systémique du bassin versant [SEINE-NORMANDIE 95]. En termes même d'aléa et de vulnérabilité, l'analyse de risques doit rigoureusement définir le support et les hypothèses géographiques du modèle utilisé.

Un exemple éloquent de risque à forte dominante géographique est le TMD (Transport de Matières Dangereuses) [GLATRON 97]. La particularité du TMD réside en effet dans la mobilité des menaces, sous la forme, entre autres, de camions-citernes évoluant sur le réseau routier : on parle ainsi de « risque-transport », à différencier du « risque-site », localisé au niveau des entrepôts de matières dangereuses.

L'aléa de TMD est défini par les caractéristiques de l'accident (nature des produits, localisation et étendue spatiale) et bien sûr par la probabilité qui lui est associée. L'analyse géographique de l'aléa fait ainsi appel aux deux principes suivants :

- le principe d'éloignement des installations, auquel on associe la présence localisée du risque-transport sur les réseaux de communication ;
- la pratique du zonage, selon laquelle chaque zone à risque correspond à un périmètre tracé autour des entrepôts et des flux de matière.

Pour être complet, la modélisation de l'aléa doit enfin intégrer l'aspect probabiliste du risque de TMD, par exemple au moyen de simulations de flux de TMD dans un SIG.

L'analyse de la composante vulnérabilité des risques de TMD est autant - sinon plus délicate, en ce sens qu'elle doit rendre compte non seulement des dégâts matériels causés par l'accident de TMD, mais également des dommages provoqués sur les nappes phréatiques et des préjudices causés aux populations. À défaut de données explicites concernant ces valeurs, [GLATRON 97] a choisi une méthode de quantification consistant, pour chaque parcelle, à évaluer les trois types de vulnérabilité précédemment cités conformément à un ensemble de valeurs de références, puis à en faire la synthèse par le biais d'une clé de détermination.

Dans ce type d'étude, la vulnérabilité est appréhendée de manière empirique et intuitive en faisant intervenir des paramètres que le bon sens juge pertinents pour l'analyse. La quantification de la vulnérabilité se résume à des méthodes d'analyse spatiale - essentiellement des croisements de couches - dont la mise en œuvre serait grandement facilitée par l'emploi de SIG.

Un exemple analogue en matière d'analyse de la vulnérabilité concerne les inondations. Pour ce type de risque, les modèles d'aléa ne font pas tant appel à la géographie qu'à des modèles hydrauliques et hydrologiques spatialisés sur un MNT. Néanmoins, de tels modèles prennent de plus en plus en compte des informations géographiques relatives à l'occupation des sols, c'est-à-dire non seulement les types de sols et leurs caractéristiques physiques, mais également l'existence de constructions en trois dimensions.

En ce qui concerne l'évaluation des dommages potentiels, l'analyse des risques d'inondations fait largement appel à des méthodes de découpage spatial en fonction de l'occupation des sols, à l'image de celle entrevue pour le risque de TMD. Dans le souci de confronter explicitement les valeurs d'aléa et de vulnérabilité, [TORTEROTOT 93] propose de superposer d'une part le découpage en zones inondables issu des modèles hydaulique et hydrologique, et d'autre part le découpage en unités homogènes en termes de vulnérabilité, déduit de l'occupation des sols.

Dans cette étude, la vulnérabilité résulte en définitive de l'impact d'un phénomène donné sur une unité soumise et conduit ainsi à décrire l'espace à la fois au niveau des paramètres physiques du phénomène et au niveau de l'occupation du sol. La modélisation spatiale atteint ses limites notamment lorsque les données disponibles sur l'un ou l'autre des niveaux de description sur la zone d'étude constituent un facteur limitant à la description et à la caractérisation de l'espace. La qualité des résultats obtenus dépend bien sûr de la réalité du modèle échafaudé, mais également de la qualité des tableaux et fonctions d'endommagement issus d'analyses économiques pouvant aussi intégrer la dimension spatiale.

D'une manière générale, les analyses de l'aléa sont issues de modèles physiques bien rôdés et pour lesquels l'aspect spatial des phénomènes n'appelle pas de réflexion géographique particulière. Ainsi, de nombreux compartiments de la physique interviennent non seulement dans la modélisation des phénomènes naturels (mécanique des fluides, météorologie, sismologie, etc.), mais également dans celle de phénomènes d'origine anthropique (mécanismes de diffusion pour les phénomènes de pollution, physique nucléaire, etc.) pour lesquels, d'ailleurs, l'aspect probabiliste est amplement traité par les méthodes formelles de type « arbres d'événements et de défaillances ».

En revanche, ainsi que nous avons pu le constater à travers les deux exemples précédents, l'analyse de vulnérabilité possède une composante géographique importante, fondée en partie sur la description de l'occupation des sols et suscitant ainsi l'intérêt de la BD TOPO de l'IGN dans ce domaine applicatif. Ces quelques constatations ont conduit, dans un premier temps, le laboratoire COGIT à articuler l'Action de recherche « Risques » autour de la thématique « vulnérabilité ».

La part des réseaux dans l'analyse de vulnérabilité

Le niveau de vulnérabilité est particulièrement sensible aux milieux peuplés et aux activités humaines. De fait, les facteurs spatiaux prenant part aux risques en termes d'enjeux sont la densité humaine, les voies de communication et la répartition des ressources.

Dans cette manière de percevoir le risque, les unités spatiales jouent un rôle fonctionnel et interagissent entre elles par le jeu des acteurs peuplant et gérant un territoire en constante évolution. L'aspect spatial des phénomènes ne se limite donc pas à la statique des territoires et de l'occupation du sol, mais également à sa dynamique. Ainsi, la vulnérabilité des territoires se ramifie à l'image des réseaux et une catastrophe naturelle ou technologique paralyse non seulement les régions sinistrées, mais également toutes celles qui en dépendent par l'intermédiaire de réseaux [GLEYZE 00].

L'existence d'échanges - ou plus généralement de mises en relation entre différents acteurs - est caractéristique de la notion de réseau. Les réseaux sont omniprésents, particulièrement dans le milieu urbain, de par la concentration de population et d'activités, l'accumulation des richesses et la présence de hiérarchies politique et économique.

En termes de risques, les dépendances croissantes des populations vis-à-vis des réseaux d'énergie, de communication et de transport accroissent en parallèle leur vulnérabilité aux risques d'interruption de ces mêmes réseaux. Plus précisément, [CHALINE, DUBOIS-MAURY 94] définissent le risque de réseau comme un événement aléatoire (en nature, en intensité et dans le temps) perturbant le fonctionnement et l'évolution du territoire. La survenance d'un tel événement peut être causée par la Nature, le dysfonctionnement même de systèmes ou de réseaux, ou encore la défaillance des organisations publiques.

En termes de vulnérabilité enfin, [BLANCHER 98] identifie les facteurs aggravants et expliquant les effets des risques de réseaux comme étant :

- la localisation spatiale et la densité : la concentration spatiale et la multiplication des interactions accroissent la vulnérabilité ;

- l'enterrement des réseaux et l'urbanisme souterrain : la multiplication des réseaux souterrains conduit à un encombrement du sous-sol, rendant les différents réseaux inter-dépendants en même temps que la localisation des pannes est rendue difficile ;
- les interdépendances et les effets d'une concentration de réseaux : parce que les réseaux structurent l'espace, ils peuvent aussi diffuser les sinistres en déplaçant l'aléa (par exemple : la pollution des eaux) ou en diffusant et en amplifiant l'impact de l'aléa (par exemple : une catastrophe urbaine entraîne des embouteillages et provoque le ralentissement des secours) ;

- la concentration du commandement et des pouvoirs dans le milieu urbain : par extension, la ville peut être assimilée à ses territoires environnants et former un bassin-versant de risques ; dans un tel espace, une catastrophe peut entraîner successivement urgence, crise puis chaos lorsqu'aucun système de communication alternatif ne peut épauler les autorités politiques.

Ces quelques considérations laissent entrevoir l'étendue des thèmes de recherche en géographie appliquée à l'étude de vulnérabilité des risques de réseaux.

La résolution des problèmes associés passe, en effet, par la définition de la zone d'étude, des réseaux, des phénomènes d'interaction entre les réseaux et des acteurs impliqués dans leur fonctionnement. Elle passe aussi par le choix des vulnérabilités prises en compte dans l'étude, par la modélisation de l'organisation fonctionnelle des réseaux et enfin par l'élaboration d'une méthode de quantification des dommages et des pertes subies, dont la difficulté est sensiblement accrue par l'importance de la part des dommages indirects.

Orientation des travaux actuels

Parmi les études de vulnérabilité associée aux risques de réseaux, nous avons choisi de nous intéresser à l'évaluation de l'impact des défaillances du réseau routier à la suite de catastrophes.

Les pertes associées correspondent aux dommages tangibles indirects sur le fonctionnement de l'ensemble des activités (activités à vocation économique, mais aussi sociale, de transport, distribution ou communication) exclusivement à la suite de dommages directs structurels sur le réseau routier.

Ces perturbations fonctionnelles dépendent, à la fois :

- de l'importance des coupures enregistrées sur le réseau routier (nombre, localisation, durée) ;

- de l'importance des activités touchées par le dysfonctionnement du réseau routier ;

- de la gravité des désordres causés (par exemple : le nombre de personnes privées d'un service suite à l'inaccessibilité de ce dernier, l'augmentation des coûts des secours depuis un hôpital étant donnée la non-disponibilité de certains tronçons de route, etc.) ;

- de la réaction de la société pour remédier à l'endommagement du réseau routier et à la reprise du fonctionnement normal des activités.

Ce sujet de recherche a déjà fait l'objet d'études, essentiellement à dominante économique.

En 1980, le Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie [ENVIRONNEMENT 80] proposait de chiffrer le montant monétaire correspondant aux pertes de temps dans les transports routiers, à la suite de l'endommagement de tronçons de route dûs aux effets indirects des crues. Une telle étude nécessite, d'une part, de caractériser les dégâts du réseau routier, c'est-à-dire d'identifier et de caractériser les coupures et les itinéraires de déviation, d'autre part, de déterminer des données économiques de référence concernant l'augmentation du coût de la circulation automobile et les heures de travail perdues.

Ces données de référence ont pour objectif de mettre en relation la rentabilité horaire des investissements routiers et la valeur moyenne de l'heure travaillée : il devient ainsi possible d'avoir une estimation du coût du nombre d'heures perdues compte-tenu des coupures routières pour le scénario de crue envisagé.

Plus récemment, une étude de même type a été menée afin d'évaluer les perturbations routières sur l'ensemble de la région Ile-de-France dans le contexte précis d'une inondation de type 1910 ou 1955, avec ou sans effet des barrages en amont [CRUES IDF 98].

La méthode consiste à simuler le trafic routier à partir d'un modèle établi par l'IAURIF (Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région Ile-de-France) sur le réseau routier disponible, compte-tenu du scénario de crue retenu. Les

résultats sont résumés au nombre total d'heures perdues par scénario, dont l'équivalent monétaire est obtenu selon des barêmes économiques tenant compte de la variabilité du trafic selon l'heure du jour, le jour de la semaine et le nombre de personnes par voiture.

Ces deux manières d'appréhender le problème considèrent les dommages indirects dans leur ensemble, c'est-à-dire en appliquant des règles de calcul agrégeant l'ensemble des activités sinistrées, d'une part, et les comportements individuels, d'autre part. Partant de ce constat, le travail de thèse de Jean-François Gleyze se propose de formaliser l'étude des perturbations fonctionnelles en examinant - localement puis globalement - le rôle du réseau routier dans le fonctionnement des différentes activités, au travers des relations et fonctions topologiques des objets présents au sol (parcelles et routes).

Sur une zone d'étude dont l'échelle peut varier de la commune à la région, on suppose que l'on dispose de données relatives :

- au réseau routier : caractéristiques géométriques, topologiques et sémantiques (largeur, nombre de voies, sens, etc…) ;
- à la répartition de la population : par exemple à partir de la localisation des habitations ;
- aux lieux stratégiques correspondant à différentes activités (commerces, hôpitaux, etc).

Soulignons au passage que l'ensemble de ces données peuvent être déduites de bases de données de l'IGN, telles que GÉOROUTE et BD TOPO. Cela étant, on se propose d'étudier les relations fonctionnelles induites par les activités sur le réseau routier, selon que l'état de ce dernier soit normal ou plus ou moins endommagé.

Dans le cadre d'une activité donnée et pour chacune des configurations envisagées, on se fixe pour objectif d'évaluer :

- les zones d'influence des différents lieux stratégiques sur la zone d'étude ;
- l'accessibilité de chacun de ces lieux par rapport à l'ensemble de la zone ;
- l'importance de chaque tronçon de route en termes de fréquentation, pour des trajets relatifs à l'activité considérée.

L'essentiel d'une telle étude repose donc sur la modélisation du réseau routier, de son endommagement, des espaces qu'il dessert et du fonctionnement des activités induit par le transport sur route en période normale comme en cas de crise. Afin de privilégier une approche fondée sur l'analyse spatiale, les aspects économétriques du problème pourront provisoirement être contournés :

- en exprimant le « potentiel » des lieux stratégiques repérés au sol, comme par exemple : la valeur monétaire d'un commerce ou la valeur sociale d'un bâtiment administratif par un paramétrage fonction de l'occupation du sol ;
- en identifiant les populations résidant sur la zone étudiée par un procédé similaire - en l'occurrence en estimant la densité de population compte-tenu de la localisation des habitations et des attributs disponibles de la base (cela rejoint en partie le travail de thèse d'Annabelle Boffet sur la caractérisation du milieu urbain pour la généralisation).

Le premier volet de l'étude consistera à caractériser la notion d'accessibilité. S'agissant d'évaluer les perturbations engendrées par des coupures routières, il nous est apparu pertinent de comparer les facilités d'accès à un lieu donné de l'espace avant et après la catastrophe.

Au niveau d'analyse le plus simple, le problème revient à considérer et à quantifier la relation élémentaire entre deux points M et N quelconques de l'espace étant donné le réseau routier disponible. Il est bien entendu que le contexte de risque rend la notion de plus court chemin inadaptée à ce type de problème et conduit au contraire à prendre en compte l'existence de déviations.

Il s'agira ainsi de définir un indicateur représentatif non seulement de la distance MN sur le réseau, mais également de la variété des chemins possibles entre ces deux points, compte-tenu de la topologie du réseau, de la géométrie des tronçons et d'attributs, tel que le nombre de voies (capacité) ou la vitesse maximale autorisée (flux). En définitive, cet indicateur serait la somme des contributions individuelles des différents tronçons susceptibles d'intervenir dans la relation entre les points M et N.

La figure B.5.2, page suivante, donne un aperçu des questions qui se posent dans la quantification de la contribution des tronçons de route à la relation entre deux points M et N :

- topologiquement : quels sont les tronçons de route à considérer afin de caractériser la collection des itinéraires possibles entre M et N ? Est-il pertinent, par exemple, de définir une zone autour du segment [MN] à l'image de celle délimitée par un ovale sur cette figure ?

- géométriquement : dans quelle mesure un tronçon de route donné participe-t-il à la mise en relation des points M et N ? Doit-on faire considérer, par exemple, la distance et l'orientation relative du tronçon en question par rapport au segment [MN] ?

- sémantiquement : comment paramétrer les informations relatives, par exemple, à la capacité et au flux des tronçons ?

À partir de cette réflexion, une manière de quantifier l'accessibilité à un lieu stratégique A consiste à agréger les valeurs de l'indicateur trouvées pour l'ensemble des relations entre ce lieu A et chaque point M de la zone d'étude. L'agrégation de ces valeurs n'exclut pas la pondération éventuelle par un coefficient représentatif, par exemple, de la densité de personnes susceptibles de se rendre en A.

À ce stade, une route est perçue uniquement dans le cadre d'étude de liaisons entre deux points de l'espace (approche locale du rôle du réseau). Pour savoir maintenant si une route est « significative », c'est-à-dire si elle joue un rôle important au sein du réseau (approche globale du réseau), il faudrait envisager la contribution de la route considérée au sein de « toutes » les liaisons possibles entre les points de l'espace, puis d'établir son « degré de significativité », c'est-à-dire un score global représentatif de cette contribution.

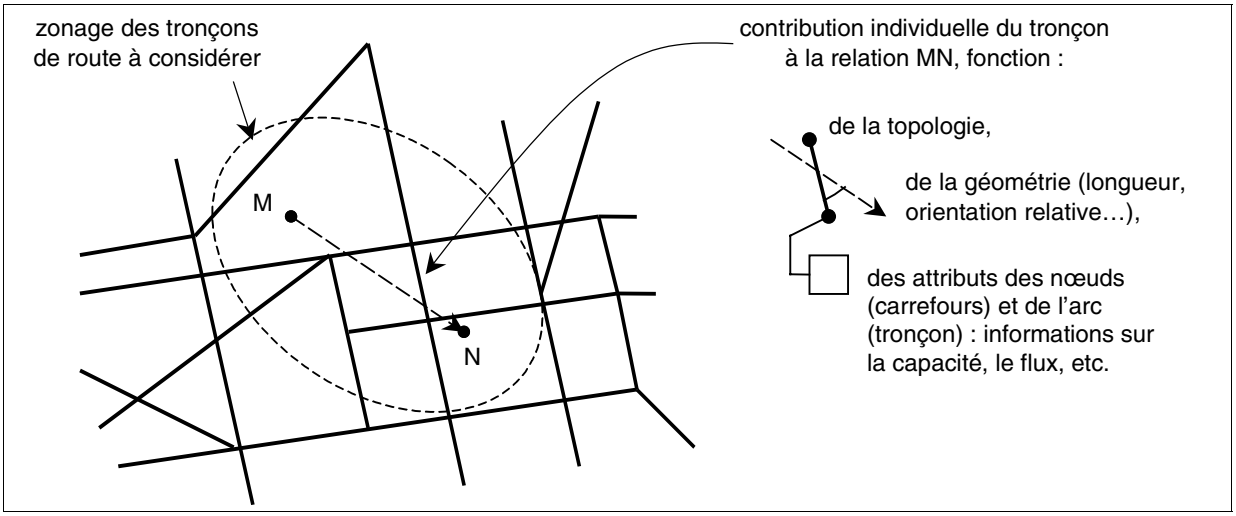


***figure B.5.2** : pistes pour la caractérisation de la relation entre deux points d'un espace desservi par un réseau*

L'ensemble de « toutes » les liaisons à étudier pourrait regrouper toutes les relations se rattachant à une activité donnée, ou plus généralement, toutes les relations entre les habitants de la zone. D'une manière ou d'une autre, on serait ainsi amené, selon le cas, à pondérer les relations considérées par l'importance du lieu stratégique fournisseur de l'activité ou de la densité de population.

De toute évidence, la détermination d'une méthode appropriée pour la quantification de la notion d'accessibilité, et plus précisément, de la contribution des tronçons de route aux relations sur le réseau routier fera appel aux domaines de la théorie des graphes et des statistiques spatiales.

Les indicateurs proposés seront testés sur des jeux de données issus de la BD TOPO - l'occupation des sols fournira, entre autres, l'information relative à la localisation des activités et des populations. L'utilisation du SIG ArcView couplé au logiciel de statistiques S-PLUS permettra enfin de visualiser et d'évaluer la qualité des résultats obtenus.

Conclusion et suite

En matière de risques, la dimension géographique prend toute sa mesure dans l'analyse de vulnérabilité. Cette composante du risque est en effet étroitement liée à la nature de l'occupation des sols et, plus généralement, à la structuration de l'espace.

À ce titre, la logique de réseaux confère une valeur fonctionnelle aux activités, susceptible d'être diminuée par l'endommagement même des réseaux. Les pertes associées correspondent en grande partie à des dommages tangibles indirects dont la quantification est délicate, non seulement en termes de modélisation économique des phénomènes mis en jeu, mais également dans la description spatiale et fonctionnelle des activités articulées sur réseaux.

Dans le cadre particulier des perturbations fonctionnelles engendrées par des coupures de routes, ce type de problématique conduit à introduire les notions d'accessibilité et de contribution des tronçons de route au sein d'un réseau

routier. L'évaluation de tels critères nécessite notamment d'élaborer des indicateurs prenant en compte la topologie, la géométrie et la sémantique du réseau routier.

Au-delà des tests qui devront être réalisés sur des jeux de données réels, afin de rendre compte de la pertinence des indicateurs proposés, le travail pourra se prolonger autour de :

- l'étude des coupures routières : la multiplicité des risques induit l'endommagement du réseau routier de manière aussi bien localisée (effet des inondations) que diffuse (effet des tempêtes) ;
- l'établissement de priorités dans la réparation des tronçons de routes endommagés : le fait de pouvoir comparer deux états figés du réseau routier (états normal et endommagé) doit permettre de déterminer l'ordre dans lequel la réparation des routes est la plus avantageuse pour la société, par exemple par le biais de simulations ;
- la détermination d'indicateurs statistiques globaux pour décrire le réseau routier : l'application de la méthode à des graphes simulés permettra éventuellement de mettre en évidence des caractéristiques statistiques pertinentes pour la description du réseau routier dans une optique fonctionnelle (étude des densités de routes, de l'orientation des arcs, etc).

Références

[BLANCHER 98] Philippe Blancher : *Risques, ville et réseaux techniques urbains*, in Risques et réseaux techniques urbains, collections du CERTU, vol. 18, pp. 13-24, 1998.

[CHALINE, DUBOIS-MAURY 94] Claude Chaline & Jocelyne Dubois-Maury : *La ville et ses dangers. Prévention et gestion des risques naturels, sociaux et technologiques*, collection « Pratiques de la Géographie », éditions Masson, Paris, 256 pages, 1994.

[CRUES IDF 98] Hydratec, SIEE, Territoires Conseil Associés : *Évaluation des dommages liés aux crues en région Ile-de-France*, rapport de synthèse, 107 pages, annexes, août 1998.

[DOLLE 00] Lenny Dolle : *Cartographie du risque : représentation de l'aléa et de la vulnérabilité. Exemple des accidents de la route*, rapport de DESS : Image, Multimédia, Sciences Territoriales, Université Nice Sophia Antipolis, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-019/S-STA-LD, septembre 2000.

[ENVIRONNEMENT 80] Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie : *Lutte contre les inondations. Méthode sommaire d'évaluation des critères économiques*, rapport de la Direction de la Prévention des Pollutions, Service de l'Eau, Sous-Direction des Eaux Continentales, 75 pages, annexes, mars 1980.

[GENDREAU, LANG 99] Nicolas Gendreau & Michel Lang : *La méthode Inondabilité du CEMAGREF*, cours ENGREF « Modélisation mathématique pour l'évaluation et la gestion des risques », décembre 1999.

[GIVONE 98] Pierrick Givone : *Risques naturels et transcriptions cartographiques*, in Revue Ingénieries - eau, agriculture, territoire du CEMAGREF, numéro spécial 1998 « Risques naturels : avalanches, crues, inondations, laves torrentielles, incendies de forêt », pp. 79-85, 1998.

[GLATRON 97] Sandrine Glatron : *L'évaluation des risques technologiques majeurs en milieu urbain : approche géographique ; le cas de la distribution des carburants dans la région Ile-de-France*, thèse de doctorat en Géographie, université de Paris-I Panthéon-Sorbonne, UFR de Géographie, 393 pages, annexes, décembre 1997.

[LEROY, SIGNORET 92] Alain Leroy & Jean-Pierre Signoret : *Le risque technologique*, collection « Que Sais-je ? », n° 2669, éditions PUF, 128 pages, 1992.

[MUNIER 99] Bertrand Munier *: Perspective historique de l'évolution des modèles de décision*, Groupe de Recherche sur le Risque, l'Information et la Décision, cours ENGREF « Modélisation mathématique pour l'évaluation et la gestion des risques », novembre 1999.

[SEINE-NORMANDIE 95] Agence de l'Eau Seine-Normandie : *Étude de l'écosystème Seine-Amont*, rapport des sociétés AREA, EPTEAU, STRATEGIS, 11 pages, 1995.

[TORTEROTOT 93] Jean-Philippe Torterotot : *Le coût des dommages dus aux inondations. Estimation et analyse des incertitudes*, thèse de doctorat ENPC en Sciences et Techniques de l'Environnement, 288 pages, annexes, octobre 1993.

Publication

[GLEYZE 00] Jean-François Gleyze : *Introduction au Risque*, IR2000/LaR, rapport interne, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-030/S-RAP-JFG, février 2000.

B.6 Vers une approche de modélisation des bases de données géographiques pour une intégration cohérente des mises à jour

Hakima Kadri-Dahmani

Résumé

Le travail présenté dans cet article traite du problème de la gestion de l'évolution de l'information géographique. Son originalité réside dans le fait que ce traitement est fait dès l'étape de conception des bases de données. Il vise à fournir un système destiné à faciliter la mise à jour des données géographiques tout en assurant un maintien continu et automatique de la cohérence des bases de données géographiques lors de l'intégration de ces modifications. À l'heure actuelle, tous les travaux qui s'intéressent au même problème utilisent des systèmes d'information géographique qui ne prennent pas en compte cette notion d'évolution, puis essaient de résoudre les problèmes qui en découlent *a posteriori.*

Dans cet article, il s'agit d'introduire l'évolution des données géographiques en tant que sujet d'étude à part entière et d'illustrer la diversité et la complexité des problèmes que celui-ci met en jeu. Le cadre général à notre travail sera alors précisé. En situant le travail réalisé dans son contexte, nous espérons ainsi permettre au lecteur de mieux en distinguer la portée et les limites. Pour cela, nous commençons par présenter le contexte de notre étude. Ainsi, les différentes étapes par lesquelles passe une information d'évolution (i.e. depuis sa collecte jusqu'à sa propagation dans la base de l'utilisateur) seront détaillées et la complexité des problèmes qui se posent sera illustrée. À partir de ces problèmes, nous situons la problématique directe de notre travail. Puis, nous donnons une ébauche générale de l'approche que nous avons retenue pour tenter d'apporter une solution à cette problématique.

Contexte

Le rôle d'un fournisseur de données tel que l'IGN est de fournir une information aussi riche, juste et cohérente que possible. Or l'évolution de cette information, nécessite des changements sur les données qui la représentent. Cela oblige le fournisseur, non seulement à mettre à jour régulièrement les jeux de données qui sont en sa possession, mais aussi de permettre la mise à jour des données qui sont chez l'utilisateur. Ainsi, avant qu'elles ne soient intégrées dans les bases des utilisateurs, ces mises à jour passent par plusieurs étapes, non sans problèmes [BADARD 97], que nous classons en trois étapes principales selon que le traitement de la mise à jour s'effectue au niveau du producteur (l'intégration), de l'utilisateur (la diffusion) ou des deux (l'échange). La figure B.6.1, page suivante, illustre ce classement ainsi que l'enchaînement des différents traitements que subit une information de mise à jour ; sa *collecte,* son *intégration* dans la base du producteur, son *échange* avec l'utilisateur et enfin sa *diffusion* dans la base de cet utilisateur.

Collecte de l'information d'évolution

La collecte de l'information d'évolution est la première étape dans la chaîne de la mise à jour. Même si cette mise à jour se traduit généralement par un changement dans le schéma des données, ce changement peut avoir plusieurs causes [BADARD 97].

- *Les évolutions terrain :* ce sont toutes les évolutions spatio-temporelles qui concernent les entités du monde réel modélisées dans les bases de données géographiques.
- *Les corrections d'erreurs* : elles correspondent à des corrections d'une ancienne version de la base de données pour refléter au mieux la réalité terrain et ceci même s'il n'y a pas eu d'évolutions réelles. Cela peut concerner la correction d'une erreur survenue lors de la représentation de cette réalité.
- *Les changements des spécifications* : le concepteur du système d'information géographique peut trouver nécessaire de changer le modèle conceptuel de son système afin de le rendre plus riche et/ou de meilleure qualité. Cela le pousse à un changement de spécifications, qu'il s'agisse de spécifications de saisie ou de contenu.
- *Les enrichissements de la base* : cela consiste à ajouter des informations qui étaient absentes dans la base initiale. Ces informations ne correspondent pas à des évolutions terrain et affectent non seulement la structuration de l'information géographique dans la base (extension du schéma, ajout de relations, de thèmes et/ou d'objets), mais aussi l'information elle-même.

La fréquence de la collecte, et par conséquent la fréquence de révision des bases, est le premier point de discussion chez les producteurs des informations géographiques [BRÉARD 00]. Certains appliquent des procédés de *révision par lot* qui consiste à revoir toute une partie de la base à intervalle régulier.

Seulement, la définition de l'intervalle adéquat pour la révision de la partie adéquate est elle-même un sujet de discussion. Certains thèmes de la base (par exemple le thème routier) évoluent beaucoup plus rapidement que d'autres thèmes (par exemple : le thème limites administratives).

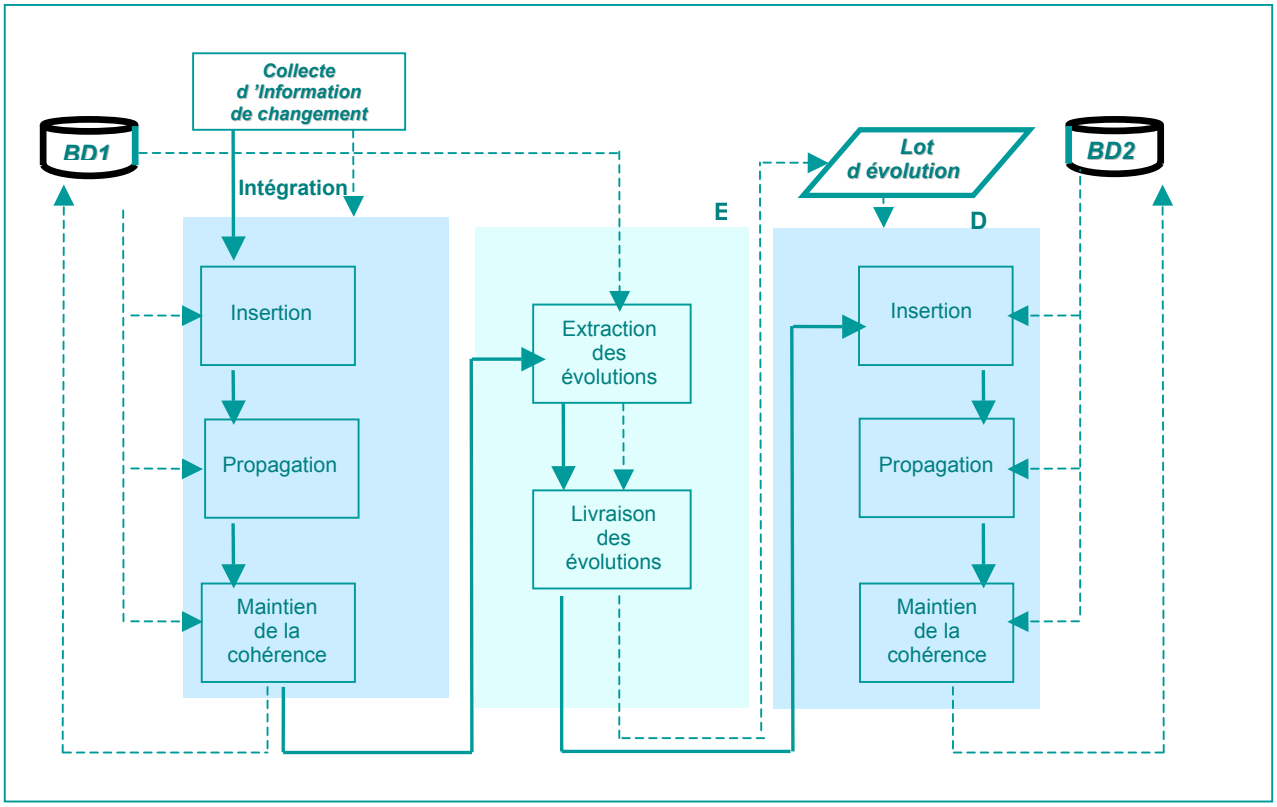


figure B.6.1 *: la chaîne habituelle d'une mise à jour*

Le décalage dans les révisions des différents thèmes, par exemple la révision tous les six mois du thème routier et tous les deux ans du thème : limites administratives, peut engendrer des incohérences dans la base. Si une route représente la limite administrative d'une commune et que le tracé de la route est modifié mais pas les limites administratives de cette commune alors la base devient incohérente.

On pourrait alors penser qu'une révision continue et homogène de l'ensemble des thèmes de la base est la solution, seulement celle-ci peut s'avérer très coûteuse et surtout inutile pour certains thèmes de la base comme justement le thème des limites administratives.

L'intégration des mises à jour

Cette étape s'effectue au niveau du producteur qui, après avoir collecté un ensemble d'informations de mise à jour, effectue les changements correspondants dans sa base de données. Il s'agit donc pour lui, d'abord de pouvoir *insérer* le changement (par exemple, la création d'une nouvelle route), puis *propager* l'influence de ce changement sur le reste de l'ensemble de la base, à savoir : vérifier tous les objets qui vont être touchés par cette mise à jour et, s'il y a lieu, effectuer les modifications nécessaires sur ces objets mêmes (par exemple, si la nouvelle route créée passe par un bois, le bois doit être nécessairement divisé en deux).

Nous ne pouvons dire qu'une mise à jour a été intégrée dans une base que si, en résultat de cette opération, nous récupérons une base toujours cohérente. C'est pourquoi, en dernière phase de l'intégration, une vérification de l'ensemble de la base pour maintenir sa cohérence s'impose.

Insertion de l'information d'évolution

Insérer une information d'évolution dans une base de données géographiques revient à effectuer, au sein de la base, le changement correspondant à cette évolution. Par exemple, l'insertion de la création de la nouvelle route revient à rajouter la route dans la base. L'étape d'insertion n'est pas toujours sans échec et nécessite un contrôle de la part de l'opérateur qui l'effectue.

En effet, cette opération peut déclencher un conflit qui peut avoir plusieurs raisons ; une différence dans la fréquence des mises à jours des différents thèmes ou encore une différence dans la précision des bases. La figure B.6.2 montre que l'insertion de la création de la route provoque un conflit puisque cette route passe par dessus un bâtiment.

figure B.6.2.a : jeu de données initial

figure B.6.2.b : jeu de données modifié

figure B.6.2 *: l'insertion d'une route dans la base provoque un conflit*

Propagation d'une mise à jour

Propager une mise à jour d'un objet dans une base consiste à chercher - et effectuer si possible - tous les autres changements qui peuvent être causés par cette mise à jour. Par exemple, la création d'une route qui passe par un bois, divise ce dernier en deux. La propagation de la mise à jour, qui réside dans la création de la route, revient à modifier, dans la base, le bois par lequel passe cette route (figure B.6.3).

La propagation de la mise à jour d'un objet donné dans la base nécessite non seulement la connaissance préalable de tous les objets de la base qui sont en relation directe ou indirecte avec l'objet modifié, mais aussi le type de ces relations. C'est avec cette connaissance qu'on peut décider des nouvelles modifications qu'on doit effectuer sur ces objets.

La représentation explicite ou non de ces relations dépend du modèle de représentation des données de la base. Le plus souvent, elles sont calculées au besoin. Plusieurs travaux proposent différentes méthodes pour établir ces relations telle que la méthode d'appariement proposée dans [BADARD 00] et [BONANI 98]. Seulement, ces méthodes demandent un calcul de plus qu'on pourrait éviter si les relations étaient établies à la conception de la base.

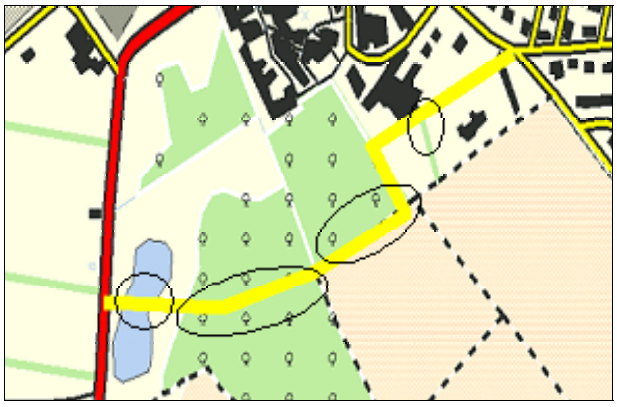


figure B.6.3 *: quelques objets touchés par la propagation de l'opération de création de la route*

Maintien de la cohérence

La réussite de l'intégration d'une mise à jour dans une base de données géographiques dépend de l'état de la base après l'intégration. En effet, la base doit rester cohérente. Or, telle que se fait l'intégration actuellement, le maintien de la cohérence n'est pas automatique.

Il nécessite l'intervention de l'opérateur, ou au mieux, celle d'un processus exécuté à la fin de l'étape de l'intégration pour vérifier la cohérence de la base.

Dans la figure B.6.4.a, page suivante, on peut voir que l'incohérence de la base se traduit par plusieurs points :

- le conflit de la route qui passe par dessus un bâtiment qui devait être détecté et corrigé au moment de l'insertion de la mise à jour ;
- les objets qui doivent être modifiés en conséquence de la propagation de cette mise à jour (le bois doit être divisé en deux), et d'autres points qui ne sont détectés qu'à cette étape. Par exemple, à l'intersection des deux routes, on doit créer un nœud ou encore la traversé du lac par la route nécessite l'ajout d'un pont.

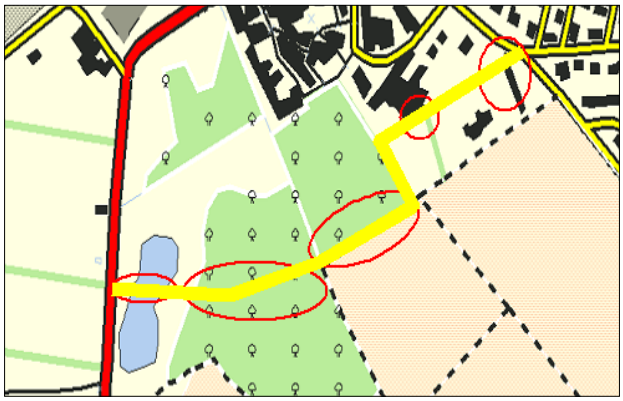


figure B.6.4.a : base incohérente

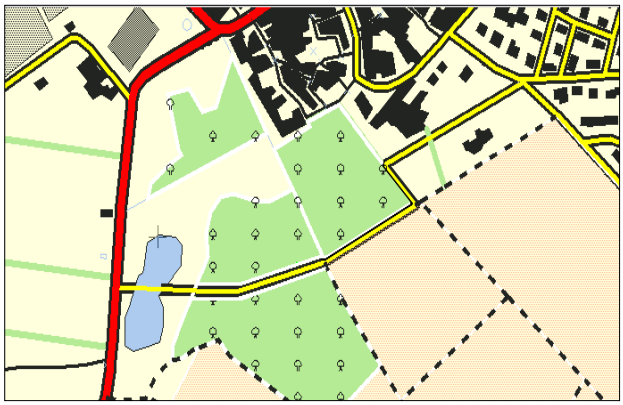


figure B.6.4.b : base cohérente

figure B.6.4 *: l'intégration de la création de la route dans la base*

Échange de l'information d'évolution

L'échange de l'information de mise à jour se fait généralement en deux étapes : l'extraction et la livraison, la première étant fortement conditionnée par la deuxième. En effet, selon le mode de livraison de l'information d'évolution, l'extraction se fait au niveau du producteur ou de l'utilisateur. Si la livraison se fait par la base entière alors l'extraction vient après la livraison. L'utilisateur qui reçoit la base entière doit en extraire les mises à jour pour les propager dans sa base. Si, au contraire, la livraison se fait seulement par lot d'évolution, alors l'extraction précède naturellement la livraison et c'est le producteur qui effectue alors cette étape. Il isole les objets modifiés et les livre à l'utilisateur.

Extraction de mises à jour

La détection des objets modifiés dans une base de données géographiques se fait, généralement, par comparaison de deux jeux de données, par exemple : celui en possession de l'utilisateur et celui fournit en deuxième temps par le producteur. Cela peut être simplement des versions différentes d'une même base ou bien une base et sa dérivée. Des méthodes de comparaison de versions de bases de données géographiques ont été developpées. Elles reposent soit sur des processus d'appariement [BADARD 00] soit sur des mécanismes d'historique [SPÉRY 99].

Livraison de l'information de mise à jour

Les mises à jour peuvent être transférées (livrées), soit, immédiatement au moment de leur changement ou à un moment prédéterminé, soit, au fur et à mesure que les changements surviennent, i.e. en continu ou en lot, soit, au besoin. Le plus souvent, la livraison de ces évolutions se fait sous forme de la base entière mise à jour. L'utilisateur désireux d'intégrer ces modifications dans son système d'information a le choix entre deux alternatives ; soit : remplacer entièrement sa base de données initiale par la nouvelle, soit: extraire lui même les évolutions subies par les entités géographiques modélisées dans la base transmise.

L'avantage de cette méthode réside dans sa simplicité d'exécution : il suffit de transférer toute la base actuelle du producteur. D'un autre coté, extraire les modifications et les propager dans sa propre base constitue un travail manuel, long et fastidieux pour l'utilisateur.

Bien que ce mode de livraison soit celui le plus utilisé, il n'est pas unique. La livraison par différentiels [BADARD 00] implique que seuls les objets modifiés, entre deux états de la base de données sont livrés à l'utilisateur. Cette approche est très avantageuse puisqu'elle permet de ne transmettre que les données qui doivent être mises à jour, sans affecter les autres données.

De plus, elle pallie le problème de la quantité d'information à transmettre puisque cette quantité devient moindre et, dans ce cas, le transfert est plus facile à effectuer. L'inconvénient de cette méthode de livraison est qu'elle soit lourde et difficile à mettre en place.

Un autre type de livraison est ce qu'on appelle les journaux. Dans ce mode, on ne livre aucun objet, mais seulement la description des évolutions que les objets (repérés par leur référence) ont subi. Cette forme de livraison peut concerner les objets ayant évolué mais également la base entière. L'inconvénient majeur de cette solution est qu 'elle suppose l'existence même de référence, ce qui n'est pas un acquis.

Diffusion des mises à jour

Diffuser une mise à jour consiste à utiliser les mises à jour d'une base de données pour en déduire les mises à jour à effectuer sur une autre base de données qui lui est initialement liée par un processus quelconque. Par exemple, la diffusion des mises à jour de la BDTopo dans la BDTop500.

La diffusion des mises à jour, telle que nous l'avons définie, regroupe les trois étapes d'Insertion, Propagation et Maintien de la cohérence.

À la différence de l'Intégration qui se passe au niveau d'une base initiale (la base producteur, par exemple), la diffusion s'effectue sur une seconde base qui, bien sur, est liée à la première par un processus quelconque (une dérivation par exemple), mais qui est en plus modifiée selon un besoin spécifique. La propagation de l'information de mise à jour dans cette seconde base - ou la base utilisateur - n'est jamais sans problèmes et cela quel que soit le mode de livraison de cette information. Les mêmes problèmes rencontrés à l'étape d'intégration se posent au niveau de la diffusion. S'ajoutent, en plus, ceux liés à l'écart entre les deux bases [BADARD 00].

Problématique

L'objectif de notre travail est de fournir un outil destiné, d'une part, aux producteurs des données géographiques afin de faciliter la mise à jour de leurs données et d'autre part aux utilisateurs de ces données pour minimiser leur intervention lors de la diffusion d'une mise à jour.

De l'ensemble des difficultés que nous venons de citer, plusieurs questions ressortent :

- comment peut-on simplifier l'extraction des mises à jour ?
- quelle est la meilleure façon de livrer les mises à jour ?
- comment maintenir la cohérence de la base de données géographiques, que ce soit au niveau du producteur ou de l'utilisateur ?
- comment résoudre les problèmes qui découlent de la différence entre les bases ?

Jusqu'à présent, les travaux qui se sont intéressés à ces questions [HARRIE et al 99] [BADARD 00] [UITERMARK et al 98] [KILPELAINEN 95] utilisent des systèmes d'informations géographiques qui s'appuient sur des modèles qui ne prennent pas en compte la notion d'évolution ce qui ne facilitait pas leur tâche.

Cette constatation nous pousse à voir le problème de mise à jour au niveau de la représentation même des données. Nous pensons qu'une réorganisation des données géographiques dans une optique de mise à jour peut être un premier pas vers une solution générique à ces différentes difficultés. De ce fait, la principale interrogation réside dans la façon de réorganiser les données géographiques afin de faciliter la mise à jour tout en maintenant la cohérence de la base lors de l'intégration des mises à jour.

Notre approche

La question principale de ce travail est donc : « comment réorganiser les données géographiques que nous considérons afin de faciliter la mise à jour tout en maintenant la cohérence de la base lors de l'intégration de cette mise à jour » ?

Pour répondre à cette question, nous adoptons la démarche suivante :

- dans un premier temps, nous proposons un formalisme de représentation des données géographiques qui prend en compte leurs évolutions ;
- dans un deuxième temps, nous mettons en place une méthode de raisonnement permettant de s'appuyer sur un modèle qui permet la propagation des modifications et le maintien de la cohérence ;
- ce cadre général est ensuite mis en œuvre dans le contexte particulier de la mise à jour d'une base de données géographique. Plus précisément, étant donnée une information de mise à jour, le système utilise le raisonnement proposé, s'appuyant sur le formalisme proposé qui constitue la base afin d'intégrer cette mise à jour dans la base.

Choix du modèle

Le choix du modèle n'est pas encore définitif, en voici donc une première esquisse.

Il s'agit d'un quadruplet ***(D, R, M, C)***, tel que :

D : représente le domaine des variables que nous traitons. Ces variables prennent leurs valeurs dans l'ensemble des objets géographiques de la base.

Conformément à ce qui existe déjà, nous considérons trois types d'objets :

- l'ensemble des objets complexes, qui se composent d'ensemble d'objets simples ou d'objets complexes. Par exemple, une route se compose de tronçons de route ;
- l'ensemble des objets simples. Par exemple un tronçon de route, un bâtiment ;
- l'ensemble des primitives géométriques. On retient dans ce modèle, les primitives ponctuelles, linéaires et surfaciques.

R : représente l'ensemble des relations qui peuvent exister entre les variables du domaine. À partir d'une typologie existante de ces relations [BADARD 00] [BONANI 98] [JEN 99] [EGENHOFER et al 92] [DEVOGELE 97], nous construisons l'ensemble des relations que nous considérons dans ce travail, et que nous voulons le plus complet possible.

Selon la nature des connaissances qu'elles portent, nous distinguons quatre principaux types :

- les relations de distance que ce soit des distances qualitatives (la maison est loin de l'hôpital) ou quantitative (la maison est à 100 m de l'hôpital) ;
- les relations dites de topologies. Elles traduisent la notion de partage de géométrie qui peut exister entre deux objets telles que l'adjacence et l'inclusion (deux bâtiments qui se partagent un même mur) ;
- les relations de composition (une route *est composé de* plusieurs tronçons de route) ;
- les relations de correspondance (cet objet complexe rond-point correspond à ce nœud).

M : représente le lot d'évolution qui doit être intégré dans la base. Il contient les objets anciens (à modifier), les objets nouveaux (modifiés) et le type d'évolution qui permet le passage de l'objet ancien à l'objet nouveau. Il existe, dans la littérature, plusieurs typologies concernant les opérations de mise à jour [BÉDARD et al 97] [CLARAMUNT et al 94] [BADARD 00].

C : représente une séquence de contraintes qui permet, d'une part, de détecter les conflits et, d'autre part, de prendre une décision quant au conflit.

Nous considérons deux types de contraintes :

- *les contraintes sémantiques* : toutes les contraintes liées au domaine d'application géographique et aux spécifications de la base. Exemple : une rivière ne doit pas remonter un relief, un lac doit être horizontal ;
- *les contraintes géométriques* : toutes les contraintes liées à la géométrie des objets. Exemple : soient A, B, deux objets ; si A inclus B et B inclus A, alors A = B.

L'architecture générale du travail

La figure B.6.5, page suivante, fournit une illustration de l'architecture en couche sur laquelle s'appuie notre modèle. Celle-ci adresse tous les niveaux de l'information géographique.

Le niveau syntaxique

Dans ce niveau, nous établissons le formalisme de représentation des données géométriques. Nous ne traitons donc que les objets géométriques. Notre formalisme se veut assez général pour représenter les données spatiales et assez spécifique pour répondre à l'objectif de mise à jour.

Pour ce faire, il doit permettre d'exprimer toutes les primitives géométriques nécessaires à la représentation des données de la base, de définir toutes les relations possibles entre les données, de définir toutes les opérations de mises à jour qui peuvent affecter la base et enfin préciser l'influence de chacune de ces opérations sur les relations ainsi que sur les objets. Pour maintenir une cohérence dans le niveau syntaxique, nous nous appuyons sur un système à base de contraintes qui prend en compte les contraintes que nous appelons géométriques.

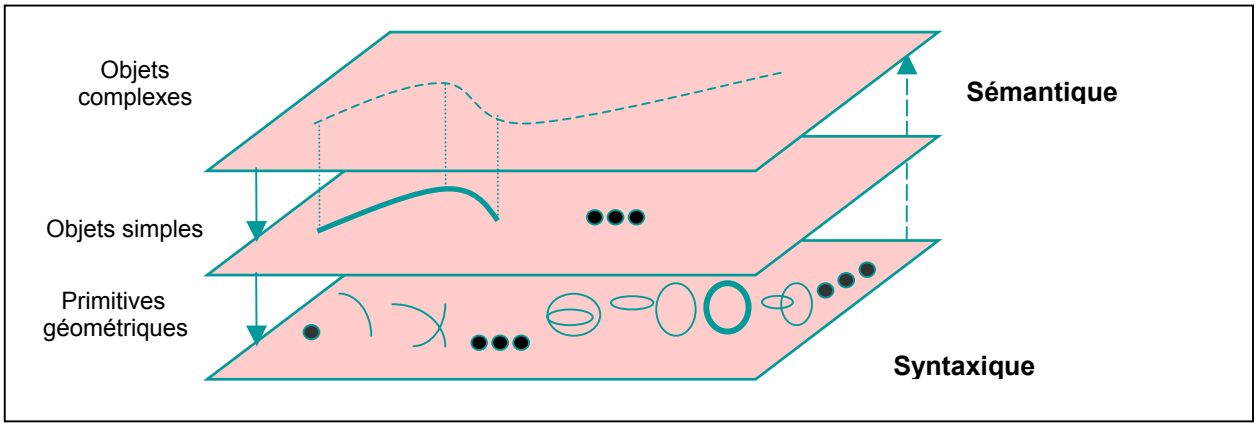


***figure B.6.5** : architecture générale*

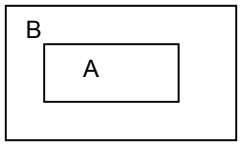
Le niveau sémantique

Les connaissances dans le niveau sémantique complètent celles que nous avons au niveau syntaxique. En effet, les seules informations que nous avons au niveau syntaxique sont d'ordre géométrique et elle ne sont pas toujours suffisantes pour la détection ni la résolution d'un conflit.

Exemple

- Soient A et B, deux objets surfaciques tel que A est *inclus* dans B ;
- soit la contrainte géométrique C = [Surfacique(A) et Surfacique(B) et Détruire(B)] $\Rightarrow$ détruire(A).

On veut effectuer une opération détruire(B).



Selon C, la destruction de l'objet B induit automatiquement la destruction de l'objet A. Dans ce cas, on remonte au niveau sémantique pour avoir plus de connaissance sur ces deux objets et la relation qui les lie et prendre une décision quant à la destruction ou non de l'objet A. On peut supposer que A représente une cour intérieur d'un bâtiment représenté par B. Dans ce cas, la destruction de A paraît logique. Supposons maintenant que A est un bâtiment à l'intérieur d'un bois représenté par l'objet B. Dans ce cas, la destruction de A n'est pas automatique et nous ne pouvons prendre la décision de détruire A.

Conclusion et perspectives

Dans cet article, nous avons présenté le contexte et la problématique de notre travail de thèse et nous avons donné une piste pour la résolution de cette problématique. Le travail à venir s'oriente vers une étude approfondie et l'établissement du formalisme de représentation pour les données que nous considérons. Nous mettons en place le modèle de raisonnement en établissant les différents algorithmes d'intégration. Bien que nous traitions de l'intégration des mises à jour, il nous arrivera de revenir sur les spécificités liées à l'un des problèmes que nous avons cités ci-dessus (voir contexte). Par ailleurs, la figure B.6.6 (page suivante) nous permettra de voir l'apport de notre démarche par rapport à une mise à jour classique.

Le principal apport est une vérification automatique et continue de la cohérence de la base à chaque modification survenue. Les relations entre les données étant explicites, le type de l'opération de mise à jour étant connu ainsi que l'influence de cette opération sur ces relations et sur les objets qu'elles relient, on sait tout de suite si cette mise à jour provoque ou non un conflit. L'insertion d'une modification d'un objet permet de connaître tous les objets ainsi que les relations qui seront affectés directement par cette modification. Ceux qui sont indirectement affectés par la même opération sont détectés lors de sa propagation. L'étape d'extraction qui posait beaucoup de problèmes, dans une mise à jour classique, n'est donc plus indispensable, pour retrouver tous les objets modifiés dans la base, puisqu'en résultat de l'intégration nous récupérons l'ensemble de ces objets ainsi que les relations modifiées. Ceci facilite aussi la livraison. Le producteur pourra, enfin, ne livrer que les objets et les relations qui ont été modifiés sans pour autant se préoccuper de les extraire. Si en plus, les données de la base utilisateur sont organisées de la même façon que chez le producteur, selon le formalisme proposé, alors la diffusion des mises à jour est beaucoup plus fluide.

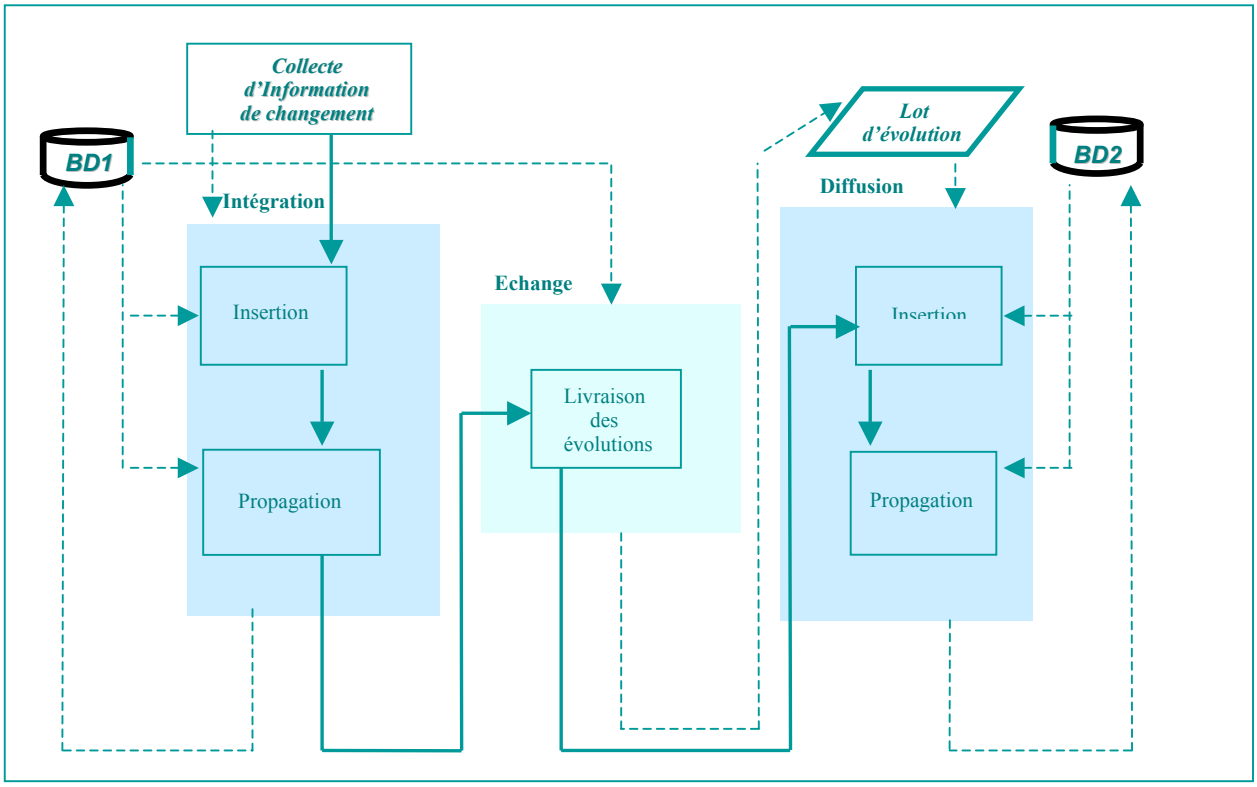


figure B.6.6 *: apport de la nouvelle approche sur la chaîne de la mise à jour*

Références

[BÉDARD et al 97] Y. Bédard, Y. van Cheistein & G. Poupart : *Actualisation des données à référence spatiale (volets échange et intégration),* Centre de Recherche en Géomatique, Université Laval, Québec, Canada, 54 pages, 1997.

[CLARAMUNT et al 94] C. Claramunt, M.H. de Séde, R. Prélaz-Droux & L. Vidale : *Sémantique et logique spatio-temporelles,* in Revue internationale de géomatique, vol. 4, n° 3-4, pp. 287-305, 1994.

[EGENHOFER et al 92] M.J. Egenhofer and J. Herring : *Categorizing Binary Topological Relationships between Regions, Lines and Point in Geographic Databases,* Departement of Survey Engineering, University of Maine, 1992.

[HARRIE et al 99] L. Harrie and A. Hellstrom : *A case Study of Propagating Updates between Cartographic Data Sets,* in Proceedings/Actes, 19th International Cartographic Conference, 11th General Assembly of ICA, Ottawa, 1999.

[KILPELAINEN 95] T. Kilpelainen : *Updating Multiple Representation Geodata Bases by Incremental Generalisation.* Geo-Informations-System, Jahhrgang 8, Heft 4, Wichmann, pp. 13-18, 1995

[SPÉRY 99] L. Spéry : *Historique et mise à jour de données géographiques : application au cadastre français,* thèse de doctorat, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, octobre 1999.

[SCHOLL et al 96] M. Scholl, A. Voisard, J.P Peloux, L. Raynald & Ph. Rigaux : *SGBD Géographiques, Spécificités,* Édition International Thomson Publishing, 1996.

[UITERMARK et al 98] H. Uitermark, P. Oosterom, N. Mars and M. Molenaar : *Propagating Updates Corresonding Objects in a Multi-source Environment,* in Proceedings 8th International Symposium on Spatial Data Handling, pp. 202-213, 1998.

[BADARD 97] T. Badard : *Premières pistes pour une mise à jour générique des bases de données géographiques,* in Bulletin d'information de l'IGN n° 69, 1998/2, pp. 25 à 31, IGN, Direction Technique, laboratoire COGIT, 1997.

[BADARD 00] T. Badard : *Propagation des mises à jour dans les bases données multi-représentation par analyse des changements géographiques,* thèse de doctorat, Université de Marne-la-Vallée, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-026/S-THE-TB, décembre 2000.

[BONANI 98] L. Bonanni : *Établissement de liens de corrélation dans un but de mise à jour des bases de données géographiques,* mémoire de DEA, Systèmes Intelligents, Université Paris IX Dauphine, laboratoire COGIT, IGN-SR 980017/S-STA, 29 septembre 1998.

[BRÉARD 00] J.-Y. Bréard : *Mise à jour en continu, aspects techniques. Étude préalable.* rapport technique interne, Direction Technique, IGN, mars 2000.

[DEVOGELE 97] Th. Devogele : *Processus d'intégration et d'appariement de base de données géographiques, application à une base de données routière multi-échelles,* thèse de doctorat université de Versailles, laboratoire COGIT, IGN-SR 970025/S-THE, 1997.

B.7 Conception d'une interface Web pour l'aide à la saisie des besoins en information géographique

Frédéric Hubert

Objectifs

L'objectif de notre recherche est d'améliorer l'accès à l'information géographique. De façon plus précise, il s'agit d'identifier les outils et les méthodes qui permettraient la conception d'interface Web beaucoup plus riches et intuitives. À l'heure actuelle, les internautes ont un accès très contraint à l'information géographique : ils peuvent la visualiser.

Nous aimerions établir un lien entre les utilisateurs novices et de l'information stockée ou calculable en facilitant l'expression des besoins en information géographique. Les besoins des internautes sont, par exemple, de rechercher les monuments d'une ville en les localisant par un symbole choisi ou de demander une carte ne représentant que les routes et certains bâtiments le long d'un fleuve.

Concrètement, il faut mettre en relation deux façons de penser : celle de l'homme et celle de la machine. Pour cela, nous présentons les outils et les langages disponibles pour accéder à l'information géographique. Ensuite, nous détaillons nos choix de conception de l'interface Web pour garantir l'expression des besoins des utilisateurs et la « compréhension » de la machine. Enfin, nous exposons l'architecture de notre interface.

Contexte

Depuis quelques années, Internet s'est révélé être un formidable outil de communication, dépassant les barrières abstraites ou physiques comme les distances ou les langues. Toute personne à travers le monde ayant un accès au réseau Internet peut s'y connecter et accéder à une source d'information d'une grande richesse et de tout genre sur le Web, la partie visible aux utilisateurs.

Le Web n'est que la mise à disposition de sites Internet, eux-mêmes constitués de pages Web. Outre la diffusion d'information, d'autres services sont disponibles comme la messagerie, la communication en direct, les transferts de données, l'exécution d'applications.

Les principales raisons de porter l'information géographique sur Internet sont les suivantes :

- *la diffusion et le transfert de données géographiques* : il est désormais possible d'accéder à des données à l'autre bout du monde et de les récupérer en garantissant des gains en temps non négligeables ;
- *l'absence de logiciels spécifiques* : la mise en place de logiciels SIG orientés Web n'oblige plus les utilisateurs à disposer de logiciels personnels. Une simple connexion à Internet leur suffit pour travailler avec des données géographiques dans la mesure des fonctionnalités proposées par les sites Web géographiques ;
- *la visualisation de données ou information en temps réel* : les internautes peuvent vouloir voir l'état courant ou les prévisions relatifs aux risques naturels (avalanches, tempêtes, inondations, séismes, éruptions volcaniques) ou relatifs à d'autres domaines comme la pollution, la météorologie, le trafic routier, etc. Pour étudier des phénomènes, les animations et les cartes 3-D peuvent apporter de nouvelles informations et offrent de nouvelles perspectives pour le rendu cartographique ;
- *le multimédia* : l'intégration du multimédia, indissociable de Web, avec les vidéos, les sons, les images, les textes, les liens hypertextes permet également d'obtenir des cartes dynamiques et plus vivantes et continuera d'offrir de nouvelles possibilités d'interaction aux internautes.

Rendre l'information géographique accessible à tous les utilisateurs n'est pas facile, puisque les principaux outils jusqu'alors développés (les logiciels SIG) étaient réservés aux experts du domaine. S'adresser aux internautes va demander des efforts particuliers pour satisfaire tous les profils d'utilisateurs.

L'accès à l'information géographique

Afin d'étudier comment les technologies Internet sont utilisées pour diffuser de l'information géographique, un état de l'existant sur les sites Web disponibles aux internautes est proposé. Nous présentons les recherches sur les langages de requêtes spatiales dont les travaux facilitent l'expression des besoins par rapport à des logiciels SIG ou SGBDG. Enfin, nous exposons les problèmes actuels rencontrés sur les sites Web et les recherches.

Existant sur le Web

Typologie des cartes sur le Web

La mise à disposition de données géographiques sur le Web se fait par l'intermédiaire de cartes ou de plans. Nous ne présentons pas les sites de métadonnées pour les professionnels qui ne recherchent pas d'informations géographiques élaborées, mais plutôt des données.

Nous proposons une typologie des cartes :

- *les cartes à lire* : nous distinguons deux sortes : les cartes passives et les cartes faiblement interactives. Les cartes passives servent uniquement comme support d'information et agissent comme des cartes papiers classiques. L'utilisateur ne peut que les visualiser. Nous les trouvons principalement dans les médias comme les journaux en ligne (www.lemonde.fr) ou la météo (www.meteo.fr). Les cartes faiblement interactives disposent de quelques fonctionnalités de visualisation comme le zoom et le déplacement ;

- *les cartes à cliquer* : elles disposent de liens affichés ou de zones cliquables sur les cartes pour accéder à de nouvelles informations en rapport avec leur localisation. Ce sont souvent des cartes de métadonnées qui indexent des informations de natures diverses par leur composante géographique. La carte de CamMap propose par exemple de visualiser des bâtiments d'une ville sous forme de photographie en cliquant des zones de la carte affichée (voir figure B.7.1) ;

- *les cartes à créer* : ces cartes proposent diverses fonctionnalités pour que l'utilisateur manipule et crée ses cartes. Cette création se fait essentiellement par la sélection de thèmes comme la majorité des sites rencontrés (voir figure B.7.2). Des sites proposent aussi de créer sa propre carte comme le site français Make Your Map (www.makeyourmap.com).

- *les animations :* elles sont de deux types : les animations spatiales et les animations temporelles. Les premières permettent une visualisation en « 3-D » avec un survol de la zone alors que les secondes proposent une carte qui évolue au cours du temps pour montrer un phénomène dynamique.

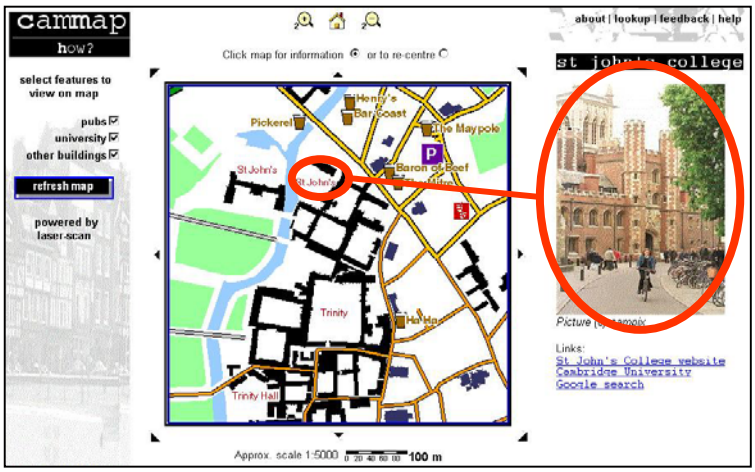


figure B.7.1 *: une carte à cliquer sur la ville de Cambridge (www.cammap.com)*

figure B.7.2 *: une carte à créer sur l'atlas national du Canada (atlas.gc.ca)*

Les outils offerts à l'utilisateur

Les outils de visualisation sont les plus présents sur les pages Web. Nous y répertorions les zooms, le déplacement, les flèches de direction, le retour à la carte initiale, l'impression, le passage à la carte précédente ou à la carte suivante. Ces outils se présentent essentiellement comme des boutons ou des liens. Les outils de cartographie élémentaires sont le choix de la légende - couleur et symboles - et la sélection des thèmes - routes, fleuves, forêts - à afficher sur la carte.

Les outils de requêtes sont présents sur certains sites. Les requêtes informationnelles sont les plus simples et les plus présentes. Elles servent à donner une information relative à un objet de la carte. Les requêtes spatiales de type SQL (Standard Query Language) sont plus rares. Elles permettent de retrouver les objets sur la carte qui correspondent à une expression calculable sur un thème. Par exemple, pour rechercher les objets répondant à la question « quelles sont les villes où la population est supérieure à 5000 habitants », nous aurons un thème égale à « population d'une ville », un opérateur « supérieur » et une valeur « 5000 ».

Des fonctionnalités d'analyse poussée sont offertes, mais elles restent rares comme le calcul d'itinéraire (www.geoweb.pt), la fabrication de cartes en ligne (www.makeyourmap.com) ou le choix de projection et de couleurs (life.csu.edu.au/cgi-bin/gis/Map).

Solutions de conception offertes

Pour proposer de l'information géographique sur le Web, il est nécessaire d'opter pour une solution conceptuelle de site, industrielle ou artisanale, chacune ayant ses avantages et ses inconvénients.

La solution « industrielle » repose essentiellement sur l'utilisation d'une extension Web-SIG. Elle garantit aux concepteurs du site de créer, mettre à jour et gérer le site. Elle agit comme intermédiaire entre une interface Web et un logiciel SIG et met à disposition les fonctionnalités étendues au Web des logiciels SIG.

Nous pouvons, entre autres, citer les produits Arc IMS d'ESRI, MapX de MapInfo, MapGuide d'Autodesk, GeoMedia Web d'Intergraph. Il est bien évident que ces solutions sont destinées à des concepteurs de sites et non aux utilisateurs. De plus, les extensions sont contraintes par rapport aux possibilités des logiciels SIG, qui peuvent ne pas disposer de certaines fonctionnalités.

La deuxième solution est dite « artisanale », car le concepteur doit se charger de réaliser lui-même les extensions entre des données et traitements géographiques et le Web. Il s'agit principalement dans ce cadre des travaux effectués dans les laboratoires de recherche comme GeoTools (www.ccg.leeds.ac.uk/geotools/).

État de l'art des langages de requêtes spatiales

Notre volonté est de pouvoir questionner la base de données géographiques en proposant des langages pour aider l'utilisateur à spécifier ses requêtes et ceci dans le contexte du Web. Les recherches sur les langages de requêtes spatiales vont dans ce sens.

Une requête classique sur une BDG consiste à désigner les objets de la base que l'on souhaite obtenir, en s'appuyant sur son schéma de données. Il s'agit d'un langage logique, qui est peu accessible au grand public. C'est ce qui rend une interface SIG complexe.

Les travaux effectués sur les langages de requêtes spatiales ont pour objectif de faciliter l'expression des requêtes en intégrant des opérateurs et en utilisant des moyens d'expression plus simples et plus intuitifs comme le texte, les icônes ou les dessins. Pour mieux comprendre les recherches effectuées dans ce domaine, nous proposons une classification de ces langages : langage de type SQL, langage textuel, langages visuels et langages hybrides.

- Un langage de type SQL est l'extension spatiale d'un langage de requête pour base de données. [EGENHOFER 94] définit le langage Spatial SQL et GRL (Graphical Representation Language) en ajoutant des opérateurs unaires et binaires et des relations spatiales (disjonction, chevauchement, intégration, etc.).

- Le langage textuel repose sur l'utilisation de la langue naturelle structurée. PICQUERY [JOSEPH, CARDENAS 88] propose une interrogation de bases de données en sélectionnant un type d'opérateurs et en saisissant les paramètres de ce dernier en langue naturelle.

- Les langages visuels proposent à l'utilisateur une interface lui permettant de « dessiner » une requête que le système analyse pour répondre à la requête de l'utilisateur. Ces langages se décomposent en deux grandes familles : les langages visuels de base et les sketchs.

- Parmi les langages visuels, CIGALES [MAINGUENAUD 95] et LVIS [BONHOMME et al 99] proposent une interface graphique qui repose sur des opérateurs spatiaux (inclusion, intersection, adjacence, liaison et distance euclidienne), des objets de bases ou métaphores (ligne et zone) et des icônes métaphores d'objets du monde réel (ville, forêt, route, etc.). Cette interface agit comme un éditeur de requêtes spatiales, où l'utilisateur construit lui-même sa requête.

- Les sketchs sont des scénarios que construisent les utilisateurs pour définir leur requête. Il s'agit d'une sur-couche des langages visuels de base, conservant la notion de métaphore, mais les opérateurs spatiaux n'existent plus. Le rôle de l'utilisateur est de « dessiner » sa requête sans se préoccuper des opérateurs, le système se chargeant d'interpréter le dessin et retrouver les opérateurs. En dehors des différentes variantes possibles, nous pouvons citer les travaux sur Sketch ! [MEYER 92], Spatial-Query-by-Sketch [EGENHOFER 96] et VISCO [HAARSLEV, WESSEL 97].

- Les langages hybrides sont des langages de requêtes spatiales qui combinent différents aspects des langages vus précédemment. [LEE, CHIN 95] propose un langage hybride à partir d'icônes. PEGASE [PROULX et al 95] est un langage hybride combinant le textuel et le graphique, qui permet d'interroger en langage naturel des bases de données géographiques. Pour cela, ils utilisent une interface graphique, dans laquelle l'utilisateur peut interagir en choisissant des valeurs dans des champs prédéfinis. L'Antéserveur Géographique [SZMURLO et al 98] est un langage hybride visuel/naturel qui repose sur un SIG. En plus de l'utilisation d'objets géographiques (ligne, point, zone), des étiquettes sont définies pour spécifier des contraintes spatiales sur ou entre ces objets en langue naturelle.

Ces langages de requêtes spatiales proposent de nouvelles techniques pour que l'utilisateur spécifie des requêtes moins difficilement. Ces recherches au-dessus de SIG peuvent être exploitées en les étendant vers le Web. Ils résoudraient ainsi quelques problèmes qui existent sur l'accès à l'information géographique sur Internet.

Les limites de l'existant sur le Web

Bien que les sites Web géographiques ne cessent de s'améliorer, quatre principaux problèmes demeurent : les problèmes informatiques, le manque de flexibilité, des fonctionnalités inadaptées et l'impossibilité d'exprimer des besoins.

Les problèmes informatiques

La majorité des problèmes informatiques est liée à des choix de programmation de la part des concepteurs de sites Web. Il est courant de se retrouver sur des pages Web, où pour visualiser une carte, il faut utiliser un navigateur spécifique (Internet Explorer ou Netscape) avec des versions précises, télécharger des composants logiciels. Les choix d'architecture en mode client/serveur et les puissances des machines peuvent considérablement ralentir les processus. La différence entre la couleur d'affichage et la couleur d'impression est également un problème général à toute application sur les ordinateurs.

Le manque de flexibilité

Le manque de flexibilité est caractérisé ici l'impossibilité, pour l'utilisateur, de prendre l'initiative du dialogue. Les utilisateurs sont souvent contraints sur un site Web géographique à suivre le plan que le système propose. Tout est prévu à l'avance et aucun détournement de la part de l'internaute n'est autorisé. De plus, le profil des utilisateurs n'est pas non plus pris en compte. Les sites sont, soit, trop spécialisés, soit trop simples.

Des fonctionnalités inadaptées

Les fonctionnalités offertes par les extensions Web-SIG sont très nombreuses et s'appuient sur celles des logiciels SIG. En comparant ces dernières avec les sites Web actuels, peu de fonctions sont offertes à l'utilisateur. Une raison à ce problème est la difficulté de transformer une fonctionnalité, jusqu'alors uniquement réservée à des experts, en la même pour des utilisateurs novices.

L'impossibilité d'exprimer des besoins

Les sites actuels proposent des traitements standards et prédéfinis. L'utilisateur peut visualiser les couches d'information, voire réaliser des calculs du plus court chemin selon des critères précodés. Les seuls besoins pris en compte sont la visualisation et même dans ce cas, la conception de légende est rare. L'utilisateur ne peut pas s'appuyer sur les propositions faites par le système comme moyen pour personnaliser sa demande et exprimer son besoin spécifique.

Les solutions offertes par les langages de requêtes spatiales laissent plus de liberté à l'utilisateur pour s'exprimer, mais il n'est possible de réaliser que des requêtes spatiales simples. L'interface graphique et les opérateurs spatiaux peuvent poser problème à des personnes novices. De plus, l'utilisateur ne sait pas ce qu'il peut demander.

Nos choix pour une interface homme-machine géographique (IHM-G)

Notre approche générale

Pour établir une connexion entre un utilisateur et un serveur de données et applications géographiques, nous devons concevoir une IHM-G (voir figure B.7.3). Son rôle est de « comprendre » le besoin d'un utilisateur pour lui proposer de l'information la plus proche de ce qu'il désire dans la limite de ce qu'on sait faire. L'utilisateur veut des données adaptées à son besoin. Pour cela, il doit l'exprimer à la machine. Or, il ne connaît pas le langage de la machine. C'est donc à la machine de s'adapter au langage de l'homme pour comprendre son besoin. Elle propose des moyens d'expression à la fois pour l'internaute et elle-même.

L'homme et la machine n'ont pas une langue commune. L'homme utilise son cerveau et ses cinq sens pour communiquer et la machine ne connaît qu'une série de 0 et 1. Cette dernière n'est pas douée de sens, mais elle peut être programmée pour les comprendre un peu. La vision, le toucher et la parole sont les principaux liens qui peuvent être établis entre un homme et une machine pour dialoguer.

Notre choix se porte ainsi sur l'utilisation de la langue naturelle pour l'expression des besoins sous forme textuelle et l'utilisation d'échantillons visuels pour aider l'utilisateur à spécifier ses besoins. La langue naturelle apporte à l'utilisateur un moyen de s'exprimer. C'est la manière la plus intuitive et la plus utilisée par les êtres humains pour s'exprimer. Les échantillons sont une autre technique pour dialoguer qui est à rapprocher de la notion d'exemples proposés par le système. Après avoir exposé nos choix de langages, nous présenterons l'architecture générale de notre système qui va permettre d'interpréter le besoin de l'utilisateur pour en trouver la solution la plus proche et nous finirons avec la dynamique du système.

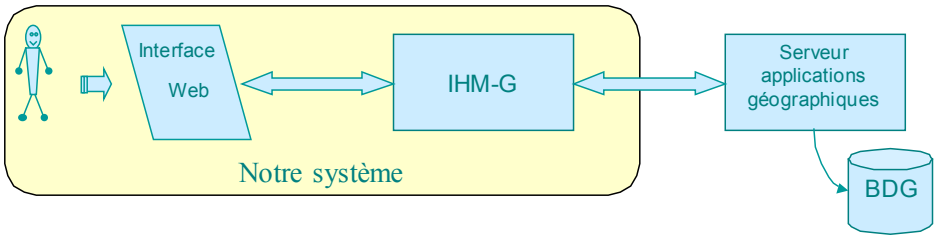


***figure B.7.3** : architecture de base de notre système*

Le recours à la langue naturelle

Généralités

Notre système va proposer à l'utilisateur de s'exprimer avec des phrases en français, et non seulement avec des mots comme dans les langages vus précédemment (Spatial SQL, PICQUERY, PEGASE, Antéserveur Géographique).

De nombreux travaux de recherche existent sur le dialogue et la langue naturelle appliqués au domaine du dialogue homme-machine et le traitement automatique des langues. [LEHUEN 97] et [SABAH et al 97] proposent des états de l'art dans le domaine du dialogue homme-machine. Ces travaux ont aussi des applications sur le Web, par exemple, le système HALPIN [ROUILLARD 00] propose un dialogue en langue naturelle entre un utilisateur et une machine pour accéder à une base de données documentaire.

L'apport du dialogue homme-machine en langue naturelle

La langue naturelle intervient ici dans le contexte d'un dialogue homme-machine. S'il n'est pas encore possible de réaliser de vraie discussion sur n'importe quel sujet, nous pouvons essayer de créer un dialogue finalisé dans un domaine spécialisé comme l'information géographique. Ce dialogue homme-machine en langue naturelle permet également d'obtenir un véritable dialogue : la majorité du temps nous n'avons qu'un simple jeu de questions - réponses où c'est toujours l'utilisateur ou la machine qui pose les questions.

Notre système doit être capable de raisonner suivant les différentes situations et de proposer des solutions dans le cadre complexe où l'utilisateur peut intervenir, tout comme le système.

À tout moment dans le dialogue, l'initiative peut venir de l'utilisateur et le système peut alors pousser l'utilisateur à s'exprimer sur les raisons qui l'ont amené à intervenir. Ainsi, le système essaie de comprendre les problèmes d'interprétation de l'utilisateur. Avec la langue naturelle, aucun obstacle n'est mis pour contraindre l'expression. La compréhension de l'utilisateur par le système dépend alors des connaissances spécifiques à l'informatique et à l'information géographique.

Le recours aux échantillons

Définition d'un échantillon

Selon notre point de vue, un échantillon est un morceau, une partie ou un extrait d'une base de données géographique, de taille relativement petite, qui est utilisé par le système pour proposer des solutions intermédiaires à l'utilisateur afin de comprendre ses besoins. Les échantillons que nous utiliserons seront de deux catégories : ceux bruts et ceux traités (voir figure B.7.4). Les échantillons bruts sont une visualisation d'une partie de BDG. Les échantillons traités sont des échantillons de base sur lesquels des traitements géographiques ont été appliqués.

L'idée de l'échantillon

L'échantillon est un extrait d'information géographique, dont les propriétés sont connues par le système. Il lui est plus facile de montrer des échantillons que de générer des phrases dynamiquement. Ainsi, l'utilisateur peut analyser les propriétés graphiques des échantillons et dire si ces propriétés s'approchent ou non de son besoin. Lorsque l'utilisateur choisit un échantillon, le système utilise les connaissances associées à celui-ci pour comprendre et s'approcher du besoin de l'utilisateur sans avoir à analyser les propriétés graphiques.

Un autre intérêt qu'apportent les échantillons est la possibilité de faciliter les traitements et calculs de l'information géographique. La plupart du temps, les calculs engendrés par l'information géographique, comme la généralisation, provoquent des temps de calculs considérables et souvent très lourds pour le système. Les échantillons vont permettre d'obtenir une solution suffisamment proche du besoin de l'utilisateur pour lancer à un instant *t* les traitements adéquats.

L'échantillon sous sa représentation visuelle est un apport important pour les utilisateurs. L'échantillon reste dans la langue de l'information géographique par sa représentation sous forme cartographique. Les utilisateurs étant habitués à visualiser des cartes, il ne pose aucun problème d'adaptation. Le dialogue en langue naturelle prend le relais de l'échantillon et offre la possibilité à l'utilisateur d'exprimer sa réaction.

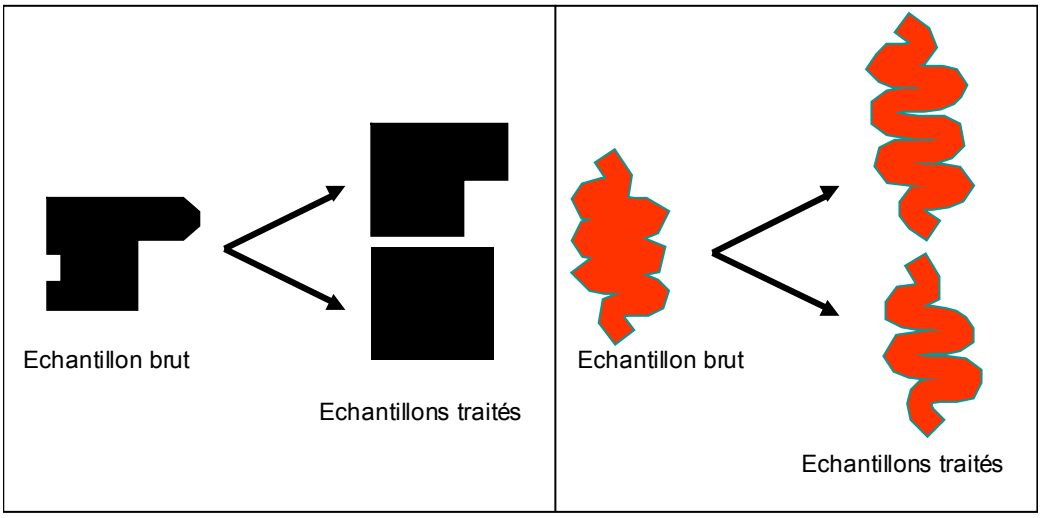


***figure B.7.4** : exemples d'échantillons de base et traités (généralisés)*

Comment serait-il possible de décrire en langue naturelle un extrait de données géographiques à proposer à l'utilisateur ? Il serait difficile à l'utilisateur de se le représenter et au système de l'exprimer. Si nous proposons à l'utilisateur de choisir entre plusieurs échantillons en les décrivant les uns après les autres, la réponse de l'utilisateur pourrait tarder à venir.

Par contre, si le système propose un échantillon et demande : « est-ce que cela vous plaît ? », l'utilisateur va facilement associer le terme « cela » avec l'échantillon et répondre. L'échantillon est donc un excellent complément à la langue naturelle. L'utilisation d'échantillons pour dialoguer avec un utilisateur est une nouvelle approche pour l'information géographique.

Les langages de requêtes spatiales proposent l'utilisation de la langue naturelle, de dessin, d'opérateurs sous forme graphique ou textuelle. Or, l'utilisation d'extraits de cartes pour aider l'utilisateur n'était jamais proposé et ceci malgré l'appartenance au domaine de l'information géographique. Grâce aux échantillons traités, l'utilisateur n'aura pas besoin de connaître les traitements géographiques et savoir que pour obtenir un échantillon A, il a fallu appliquer trois traitements avec les valeurs paramétriques W, X, Y.

Stratégies d'utilisation des échantillons

Pour que le système puisse « interpréter » les choix d'un échantillon par l'utilisateur, il doit posséder des connaissances sur les propriétés des données géographiques et des connaissances sur les traitements géographiques. Certains échantillons vont être associés à un traitement et d'autres échantillons à des propriétés de données. À partir de ce moment, différentes stratégies d'utilisation de ces échantillons pourront être déployées.

- *Stratégie par recherche de valeurs de propriétés cohérentes* : au cours du processus d'aide à la saisie, l'utilisateur se voit proposer des échantillons. Suivant les échantillons choisis, un espace de contraintes sur les valeurs des propriétés peut être défini. Le système peut émettre des hypothèses sur cet espace et va chercher à le restreindre par proposition d'échantillons. Il va pouvoir ainsi se faire une idée des besoins de l'utilisateur par rapport aux propriétés des données.

- *Stratégie via des requêtes sur les contraintes* : l'utilisateur va sélectionner un échantillon et le qualifier. Cette qualification se réalise du côté utilisateur par l'utilisation de la langue naturelle. Il va émettre un commentaire sur l'échantillon comme l'usage des termes plus grand, plus carré, rouge. Ces termes vont être interprétés dans leur contexte pour en déterminer le sens exact. Des dialogues entre l'utilisateur et le système peuvent être alors engagés. Si le système est incapable de trouver une solution échantillon, il va pouvoir lancer une application sur l'échantillon avec les contraintes adéquates.

- *Stratégie via des requêtes pour les traitements* : l'utilisateur demande un lissage d'un échantillon. Il a des connaissances sur l'information géographique. Le lissage est associé à un traitement géographique. L'échantillon correspondant, s'il est présent, est retourné à l'utilisateur. Sinon une application est lancée avec l'échantillon en question.

Mécanisme d'aide à la saisie de besoins en information géographique

Nous détaillons l'architecture générale de notre interface, devant mettre en place le dialogue proposé par notre approche, avec les différents modules et les connaissances nécessaires. Puis, nous développons un scénario expliquant le mécanisme général du système.

Architecture générale de l'IHM-G

Les modules

L'architecture de notre IHM-G se décompose en trois modules : l'interface Web, le gestionnaire de dialogue, le gestionnaire d'échantillons. Le serveur d'applications et de données géographiques représenté en figure B.7.5 n'est pas inclus dans notre système, il est utilisé par celui-ci.

- *L'interface Web* : elle sert à visualiser les résultats de façon textuelle ou graphique. Elle offre aussi des moyens d'interaction entre l'utilisateur et le reste du système : en particulier une zone de saisie de texte permettant un dialogue en langue naturelle. Cette dernière est toujours visible et utilisable par l'internaute, pour qu'il puisse interagir à tout moment avec le système. Une seconde zone sert à afficher les résultats avec des interactions possibles par l'intermédiaire d'objets graphiques. Une dernière zone propose de suivre l'évolution de la constitution du « terrain commun ». Le terrain commun correspond à des connaissances résultant d'une intercompréhension entre l'utilisateur et le système [NICOLLE, SAINT-DIZIER DE ALMEIDA 99]. Des retours sur ces accords sont alors possibles à tout moment de la part de l'utilisateur.

- *Le gestionnaire de dialogue* : le gestionnaire est le cerveau de notre système. Il se charge de faire le lien de l'interface Web au gestionnaire d'échantillons et au serveur d'applications géographiques.

Ce gestionnaire se divise en deux modules : le module de gestion des événements produits par l'utilisateur et des pages Web, et le module de dialogue.

Le premier module se charge de récupérer les événements - requêtes de l'utilisateur et interaction avec les objets graphiques - et de les renvoyer au module de dialogue dans un formalisme exploitable par ce dernier. Il dispose également d'un générateur de pages Web créant des pages à la volée qui contiennent des objets graphiques (listes, cases à cocher), du texte, des graphiques et des images relatives à des échantillons, par exemple. Pour afficher les informations provenant du module de dialogue, il conçoit des pages Web et envoie du texte dans la zone d'affichage pour le dialogue en langue naturelle.

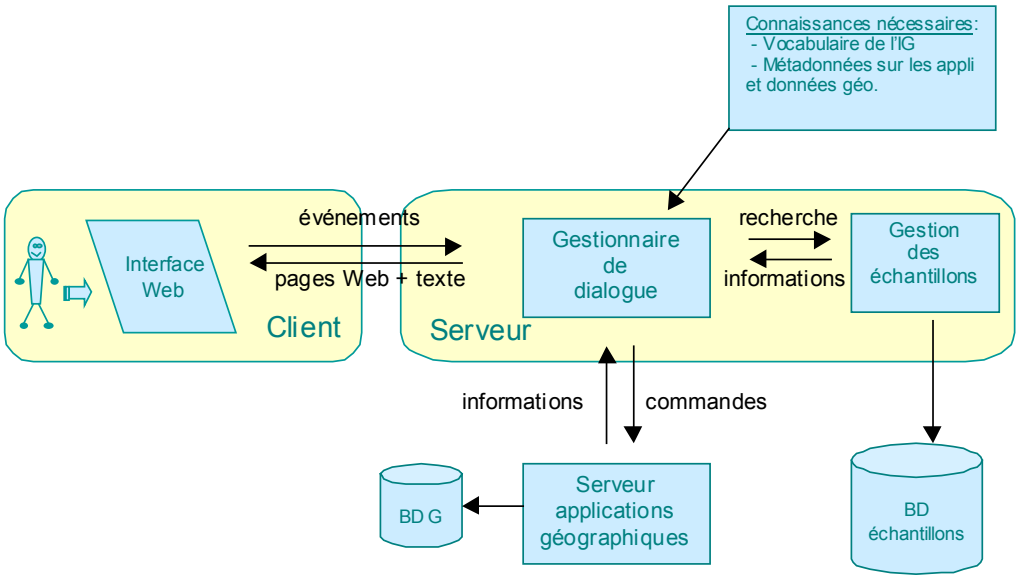


figure B.7.5 *: architecture générale de notre IHM-G*

Le module de dialogue a en charge de récupérer les événements et de les traiter par diverses actions. Il va ainsi analyser de façon syntaxique et sémantique toutes les saisies faites en langue naturelle par l'utilisateur. De ces analyses, en utilisant un historique des interactions, il va pouvoir déclencher une action comme contacter le gestionnaire d'échantillons ou le serveur d'applications géographiques.

Des processus permettent également d'enrichir l'historique, de définir des stratégies adéquates aux problèmes rencontrés, de gérer le dialogue avec des productions d'actes de langage, de signaler les éventuelles erreurs. Pour concevoir ce système, nous nous basons sur le prototype Genedic [LEMEUNIER 00]. Genedic gère un dialogue entre l'homme et la machine en langue naturelle et dispose de fonctionnalités spécifiques comme la reconnaissance des intentions de communication de l'utilisateur et la gestion des attentes.

- *Le gestionnaire des échantillons* : le rôle de ce gestionnaire est de permettre l'accès aux échantillons et d'effectuer des recherches et des analyses dessus. La connaissance des différentes stratégies doit y être intégrée. Les informations fournies par le gestionnaire d'échantillons au gestionnaire de dialogue devront présenter les différentes localisations des échantillons à afficher et les résultats des analyses.

- *Le serveur d'applications et de données géographiques :* nous avons choisi de ne pas nous baser sur un logiciel SIG particulier ou tout autre SGBD-G. Des connaissances vont être nécessaires pour pouvoir lancer des exécutions de ces applications. Un formalisme général décrivant des tâches géographiques (ou applications génériques) décomposées en séquences de traitements à appliquer à des données est en cours de conception par Bénédicte Bucher, en thèse au laboratoire COGIT de l'IGN [BUCHER 01].

Les connaissances

Trois grandes catégories de connaissances sont essentielles au bon fonctionnement de notre système :

- *le vocabulaire de l'information géographique et de la langue française* : puisque nous utilisons le dialogue en langue naturelle, nous devons disposer de vocabulaire de la langue française. De plus, comme nous travaillons dans le domaine de l'information géographique, il nous faut du vocabulaire spécifique à ce domaine. Il est nécessaire d'associer ces termes à des catégories pour rechercher des cohérences sémantiques dans les phrases ;

- *les métadonnées sur les applications et les données :* elles renseignent sur les applications et données géographiques relatives à un logiciel SIG ou un SGBD-G sous-jacent ;

- les échantillons que nous avons décrits dans la partie précédente doivent disposer d'un modèle pour être exploitables et faciliter le travail du gestionnaire d'échantillons.

Le mécanisme

Le système possède une stratégie d'aide à la décision et de négociation. Un découpage en différentes étapes permet d'en comprendre le mécanisme.

Première étape : initialisation de l'interface Web et du dialogue

Un utilisateur se connecte à notre site. L'initialisation du dialogue consiste à inviter l'utilisateur à saisir une requête dans la zone de dialogue prévue à cet effet sur la page Web.

Par exemple :

« Je suis un prototype qui va vous aider à saisir vos besoins en information géographique. Pour l'heure, je ne peux traiter qu'un certain type de requêtes. Je vous prie d'exprimer votre besoin à l'aide de la zone réservée pour saisir du texte. »

L'internaute pose alors sa requête en langue naturelle : « Je m'appelle Frédéric et je veux une généralisation des bâtiments. ». Cette requête est envoyée au gestionnaire de dialogue, qui va se charger de l'interpréter. Cette étape ouvre le processus d'aide à la saisie dans la mesure où le système a réussi à interpréter l'énoncé donné par l'utilisateur.

Seconde étape : aide à la saisie

Le système répond à l'utilisateur sous forme textuelle et/ou graphiques avec des échantillons. Suivant la précision de la demande de l'utilisateur, le système peut lui proposer de faire des choix précisant davantage son besoin. Par exemple, suivant la requête précédente, le système peut proposer une liste de bâtiments types (maisons, églises, hôpitaux, etc.) dans laquelle il devra choisir. Si l'utilisateur a choisi les maisons, le système lui propose de choisir des échantillons, affichés par échantillon brut et échantillons généralisés. L'utilisateur choisit de cette manière les échantillons qui évolueront au cours de l'interaction avec le système.

L'utilisateur a également la possibilité de qualifier ces échantillons par des commentaires en langue naturelle. Par exemple : « je veux que cet échantillon soit plus carré ». Quelle que soit l'interaction réalisée par l'utilisateur, le système récupère les événements et interprète pour obtenir de nouveaux échantillons solutions. Ce processus de dialogue se poursuit jusqu'à ce que : le système n'a plus d'échantillons à proposer ou l'internaute a validé un échantillon qu'il considérait comme satisfaisant ou qu'il a annulé ou critiqué les extraits proposés.

Divers cas de figure se présentent ensuite. Si l'utilisateur a validé un échantillon, alors l'aide à la saisie est satisfaite et terminée, le système peut passer à l'étape suivante d'exécution de la tâche. Si le système ne peut proposer d'autres échantillons, deux solutions sont envisageables : soit il contacte le serveur d'applications géographiques pour lancer une application géographique sur un échantillon, dans ce cas, il a toutes les informations et applications nécessaires pour le réaliser, soit il engage une négociation pour trouver la solution la plus proche du besoin de l'utilisateur.

Enfin, si l'utilisateur n'a pas validé les échantillons proposés, alors le système va essayer de faire dialoguer l'utilisateur pour comprendre les raisons de son désaccord. L'analyse du terrain commun peut également aider à comprendre où se trouve le problème. Dans ce cas précis, il est nécessaire de faire un retour en arrière dans les interactions déjà effectuées et repartir sur des bases correspondant aux vœux de l'utilisateur.

Troisième étape : exécution de tâches géographiques

À ce stade, l'utilisateur et le système se sont mis d'accord sur la tâche à accomplir ou les propriétés recherchées. Le système contacte alors le serveur de fonctions et de données géographiques et lui envoie des séries de commandes à exécuter. Une fois que le serveur a obtenu un résultat, le gestionnaire de dialogue se trouve averti par des informations transmises dans un format adéquat.

Dernière étape : affichage du résultat

Le gestionnaire de dialogue, ayant reçu les informations en provenance du serveur enrichit son historique des interactions, génère un énoncé pour la zone de dialogue et prépare la page Web avec le résultat à afficher. Une demande de validation est également demandée à l'utilisateur pour savoir s'il est satisfait ou non du résultat.

Conclusion et perspectives

Le rôle principal de notre IHM-G est de traduire les besoins des utilisateurs pour pouvoir dériver des données géographiques et les symboliser sur le Web. Cette traduction implique des langages de communication que nous avons choisis innovants par l'utilisation du dialogue homme-machine en langue naturelle et l'utilisation d'échantillons. Ces choix vont nous permettre de concevoir une interface sur le Web aidant à la saisie des besoins en information géographique et essayant de trouver l'information nécessaire et suffisante la plus proche du besoin.

Les travaux en cours s'articulent principalement sur la conception d'un premier prototype permettant la généralisation de bâtiments, de routes et d'îlots. L'interface Web a déjà été développée en utilisant le langage de programmation java. Pour intégrer le dialogue en langue naturelle, nous adaptons le module de dialogue Genedic [LEMEUNIER 00] à l'information géographique en étudiant le vocabulaire géographique et en l'associant à des tâches géographiques. Pour utiliser les échantillons, nous étudions un modèle de données incluant les acteurs, leurs rôles et leurs liens, un moyen d'intégrer des stratégies d'utilisation de ces échantillons et une base de données d'échantillons relative à des bâtiments, des routes et des îlots généralisés.

Pour finaliser notre prototype, les perspectives sont de connecter nos travaux avec ceux de B. Bucher pour accéder à des métadonnées sur les données et tâches géographiques. Pour l'exécution finale sur un serveur d'applications et de données géographiques, il nous faut identifier quel logiciel nous allons utiliser, en précisant que notre système n'en sera pas dépendant.

Après avoir effectué des tests avec des utilisateurs, nous analyserons les résultats obtenus pour enrichir notre prototype. L'attitude des personnes sera également étudiée pour savoir si l'interface et le déroulement des interactions avec le système se sont bien déroulés. Des modifications, en conséquence, pourront alors être apportées. Nous envisageons également d'étendre de champs de travail de notre système pour qu'il puisse aider l'utilisateur à saisir ses besoins sur d'autres domaines que la généralisation.

Références

[BONHOMME et al 99] Ch. Bonhomme, Cl. Trépied, M-A. Aufaure & R. Laurini : *A Visual Language for Querying Spatio-Temporal Databases*, ACM-GIS, 1999.

[BUCHER 01] B. Bucher : *Structuring and Enriching Metadata to Enable Users ? Access to Geographic Information Resources*, in Proceedings of the 20th International Cartographic ICC2001, Pékin (Chine), laboratoire COGIT, IGN-SR 01-008/S-COM-BB, 2001 (à paraître).

[EGENHOFER 94] M.J. Egenhofer : *Spatial SQL : A Query and Presentation Language*, IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 6(1), 1994.

[EGENHOFER 96] M.J. Egenhofer : *Spatial-Query-by-Sketch*, IEEE Symposium on Visual Language, 1996.

[HAARSLEV, WESSEL 97] V. Haarslev & M. Wessel : *Query GIS with Animated Spatial Sketches*, IEEE Visual Language, septembre 1997.

[JOSEPH, CARDENAS 88] Th. Joseph & A.F. Cardenas : PICQUERY : *A High Level Query Language for Pictorial Database Management*, IEEE Transactions on Software Engineering, mai 1988.

[LEE, CHIN 95] Y.C. Lee & F.L. Chin : *An Iconic Query Language for Topological Relationships in GIS*, International Journal of GIS, 9(1), 25-46, 1995.

[LEHUEN 97] J. Lehuen : *Un Modèle de Dialogue Dynamique et Générique Intégrant l'Acquisition de sa Compétence Linguistique : le Système COALA*, thèse de doctorat, Université de Caen, juin 1997.

[LEMEUNIER 00] Th. Lemeunier : *Modélisation Dialogique des Intentions de Communication en Dialogue Homme-Machine*, thèse de doctorat, Université du Mans, décembre 2000.

[MAINGUENAUD 95] M. Mainguenaud : *CIGALES : Un Langage Visual pour Interrogation d'un SIG*, HDR, 1995.

[MEYER 92] B. Meyer : *Beyond Icons*, IDS, 1992.

[NICOLLE, SAINT-DIZIER DE ALMEIDA 99] A. Nicolle & V. Saint-Dizier de Almeida : *Vers un modèle des interactions langagières*, *in Analyse et Simulation de Conversation : De la théorie des actes de discours aux systèmes multi-agents,* B. Moulin, S. Delisle & B. Chaib-Draa, L'Interdisciplinaire, Limonest, 1999.

[PROULX et al 95] M-J. Proulx, Y. Bédard & B. Moulin : *Développement d'un Nouveau Langage d'Interrogation de Base de Données Spatio-temporelles*, 7ème Conférence internationale sur la géomatique, Ottawa (Canada), juin 1995.

[ROUILLARD 00] J. Rouillard : *Hyperdialogue sur Internet : le Système HALPIN*, thèse de doctorat, Université de Grenoble, janvier 2000.

[SABAH et al 97] G. Sabah, J. Vivier, A. Vilnat, J-M. Pierrel, L. Romary & A. Nicolle : *Machine, Langage et Dialogue*, L'Harmattan, Paris, 1997.

[SZMURLO et al 98] M. Szmurlo, M. Gaio & J. Madelaine : *The Geographical Anteserver : a Client/Server Architecture for GIS*, EODEO, 1998.

B.8 Généralisation de données géographiques : présentation des résultats du projet AGENT

Cécile Duchêne et Anne Ruas

Introduction

Les recherches en généralisation ont débuté au laboratoire COGIT en 1991. Ces recherches se sont décomposées en trois parties :

- la généralisation des routes : développement de la plate-forme PlaGe [LECORDIX et al 97], thèses de Corinne Plazanet sur la caractérisation du linéaire [PLAZANET 96], d'Emmanuel Fritsch sur la conception de nouveaux algorithmes [FRITSCH 97] et de Sébastien Mustière sur l'utilisation des méthodes d'apprentissage appliquées aux routes [MUSTIÈRE et al 00] (soutenance prévue juin 2001), travaux de Xavier Barillot sur la caractérisation du linéaire [BARILLOT 99] ;
- la généralisation des zones urbaines : développement de la plate-forme orienté objet Stratège, thèses de Nicolas Regnauld sur la généralisation d'un groupe de bâtiments [REGNAULD 98], de Jean-François Hangouët sur l'utilisation des diagrammes de Voronoï [HANGOUËT 98], d'Anne Ruas sur la conception d'un modèle de généralisation [RUAS 99] et d'Annabelle Boffet sur la caractérisation des villes pour leur généralisation [BOFFET 00] (soutenance prévue fin 2001) ;
- la généralisation des modèles numériques de terrain : thèse de Pascale Monier sur la caractérisation du relief pour sa généralisation [MONIER 97].

Parallèlement à l'ensemble des thèses et des stages réalisés au laboratoire, le laboratoire COGIT a activement participé à deux groupes de travail sur la généralisation : l'OEEPE (groupe dirigé par Jean-Philippe Lagrange, puis Anne Ruas) et l'Association Cartographique Internationale (ACI, groupe dirigé par Robert Weibel).

L'ampleur des ressources travaillant sur la généralisation au laboratoire COGIT nous a donné une position de premier plan en la matière et nous a permis de proposer le projet Européen AGENT avec des partenaires rencontrés lors des sessions du groupe de travail de l'Association Cartographique Internationale (ACI).

AGENT est un projet (ESPRIT 24939) de trois ans, démarré le 1er décembre 1997, qui regroupait :

- le laboratoire COGIT comme leader du projet (S. Lamy) ;
- le producteur de SIG Laser-Scan Limited (M. Jackson) ;
- le laboratoire INPG Leibniz de Grenoble, spécialisé dans les systèmes multi-agents (Y. Demazeau) ;
- le département de géographie de l'université de Zurich (R. Weibel) ;
- le département de géographie de l'université d'Edimbourg (W. Mackaness).

L'objectif du projet était de concevoir un prototype de généralisation sur un SIG du commerce, basé sur le concept d'agents, intégrant des concepts issus des recherches antérieures et des algorithmes de généralisation conçus dans différentes universités.

Au niveau recherche, nous voulions valider et enrichir des concepts et nous munir d'un prototype apte à supporter nos recherches futures.

Les principes du prototype AGENT

Entre 1997 et 1999, le groupe de travail de l'OEEPE sur la généralisation a réalisé un test mettant en œuvre diverses plates-formes de généralisation automatique existant sur le marché ou dans des laboratoires de recherche. Sur chaque plate-forme, un cartographe devait généraliser un lot de données de manière interactive, en utilisant exclusivement les algorithmes disponibles sur la plate-forme. L'analyse de ce test [RUAS 01b] a montré que les algorithmes sont choisis en fonction des caractéristiques de l'objet, d'une part, des spécifications de généralisation, d'autre part. Ils sont appliqués à divers niveaux d'analyse : un objet individuel d'une base de données géographiques, un groupe d'objets organisés ou une partie d'un objet (par exemple : le virage d'une route). Les principes retenus pour le prototype AGENT sont issus de ces constatations.

Qu'est-ce qu'un agent géographique ?

Le concept d'agent et de systèmes multi-agents appartient au domaine de l'Intelligence Artificielle [FERBER 95]. Il s'agit d'une extension du concept d'objet (au sens programmation orientée objet) utilisé en informatique.

Un agent peut être défini grossièrement comme un objet qui dispose de fonctionnalités particulières lui donnant une certaine « intelligence » :

- un but à atteindre ;
- une capacité à choisir et réaliser des actions pour atteindre ce but ;
- une perception des autres agents du système ;
- une capacité à interagir, voire communiquer avec les autres agents du système.

Un système multi-agents est un système dans lequel évoluent plusieurs agents qui interagissent.

Dans le cas de la généralisation automatique, nous travaillons avec des objets géographiques présentant un certain nombre de conflits internes (tracé trop détaillé, taille trop petite) ou externes avec d'autres objets (superposition, proximité). Le but de la généralisation est de résoudre au mieux l'ensemble de ces conflits, et notre approche consiste à appliquer localement aux objets, les algorithmes dédiés aux conflits qu'ils présentent. La thèse d'Anne Ruas [RUAS 99] propose de donner aux objets géographiques une certaine autonomie pour en faire les entités décisionnelles du système de généralisation et de guider ces objets aux moyens de contraintes.

L'idée de donner de l'autonomie aux objets géographiques conduit naturellement à utiliser les concepts des systèmes multi-agents. Les objets géographiques deviennent, dans le prototype AGENT, des « agents géographiques ». Il peut s'agir d'objets initialement présents dans la base de données à généraliser, ou d'objets créés à partir de ceux-ci, par regroupement (e.g. un groupe de bâtiments) ou par division (e.g. une portion de route). Les agents géographiques sont acteurs de leur propre généralisation.

Les agents géographiques disposent d'outils pour se généraliser - des mesures de caractérisation et des algorithmes de généralisation - et sont dotés de fonctions leur permettant :

- d'analyser leur état (nature et gravité des conflits cartographiques) ;
- de choisir des algorithmes à déclencher pour résoudre ces conflits ;
- de se transformer effectivement par application d'un algorithme ;
- d'analyser l'amélioration de leur état et le cas échéant d'annuler l'opération précédente.

Un agent peut être à tout moment dans un état passif (il ne fait rien), réactif (il obéit aux ordres) ou actif (il est autonome). Les fonctions décrites ci-dessus correspondent aux différentes étapes du « cycle de vie » d'un agent qui est dans un état actif. Elles sont enchaînées par le moteur du prototype AGENT.

Les contraintes

L'opération de généralisation est guidée par un certain nombre de contraintes à respecter : la taille minimale des objets, la lisibilité, la déviation maximale autorisée par rapport à la position initiale, la préservation des caractéristiques géographiques de la zone représentée, etc. Ces contraintes sont le reflet du savoir cartographique ou de spécifications utilisateur.

On peut distinguer deux sortes de contraintes :

- celles qui sont à l'origine de la généralisation, parce qu'elles ne sont pas respectées par les données initiales (e.g. assurer la lisibilité des lignes pour une largeur de symbole donnée) ;
- celles qui tendent à empêcher une dégradation trop importante des données initiales (e.g. préserver la forme générale des bâtiments, leur position).

Durant le projet AGENT, les contraintes pertinentes pour les différents types d'objets géographiques (routes, bâtiments, rivières…) ont été identifiées et formalisées par écrit. Puis dans le modèle AGENT, les contraintes sont explicitées sous forme d'objets qui agissent comme des conseillers auprès des agents géographiques. Chaque agent géographique se voit donc adjoindre un ensemble d'objets « contraintes ». Chaque « contrainte » associée à un agent est chargée de surveiller un caractère particulier de cet agent (sa taille, sa forme, etc.). La valeur courante du caractère surveillé, appelée par simplification « valeur courante de la contrainte », est calculée au moyen d'une mesure appliquée à l'objet (par exemple, la taille d'un bâtiment est décrite par sa surface).

Chaque contrainte a une valeur but à atteindre qui dépend des spécifications de la carte (par exemple, la taille d'un bâtiment doit être supérieure à 280 m si l'échelle finale est le 1 : 50 000). Le but de chaque agent géographique est de satisfaire, au mieux, l'ensemble de ses contraintes. Bien entendu, un compromis est souvent à trouver, les buts des contraintes étant rarement parfaitement compatibles (comment réduire le niveau de détail tout en conservant au mieux la forme ?). Pour cela, chaque contrainte conseille à son agent géographique des opérations de généralisation possibles pour faire tendre sa valeur courante vers sa valeur but. L'agent géographique, entité décisionnelle du système, synthétise les propositions de ses contraintes et choisit la meilleure *a priori*.

Sur une contrainte, sont stockées sous forme d'attributs les informations suivantes :

- sa valeur courante ;
- sa valeur but, i.e. la valeur courante souhaitée ;
- sa flexibilité, i.e. la tolérance admise autour de la valeur but ;
- sa sévérité, ou degré de violation, qui est une interprétation de l'écart de la valeur courante au but ;
- son importance, qui indique dans quelle mesure il est impératif qu'elle soit respectée (l'importance permet de hiérarchiser les différentes contraintes portant sur un même objet) ;
- sa *priorité*, qui indique l'urgence avec laquelle elle doit être traitée (parce qu'on sait que le fait de diminuer son degré de violation permettra de traiter plus facilement d'autres problèmes du même objet par la suite) ;
- les *opérations conseillées a priori* à l'agent géographique par la contrainte pour diminuer son degré de violation.

La contrainte dispose de plus de méthodes permettant :

- de calculer sa valeur courante (en appliquant à l'agent géographique la mesure identifiée comme pertinente) ;
- de calculer sa sévérité, en fonction de la valeur courante du but et de la flexibilité (est-on très loin de la valeur but ?) ;
- de déduire de la valeur courante et de la sévérité une liste d'*opérations conseillées* pour améliorer son état.

La valeur but d'une contrainte, sa flexibilité et son importance traduisent des connaissances cartographiques et des spécifications utilisateur. La priorité de la contrainte, le choix de la mesure permettant de calculer sa valeur courante, ainsi que les fonctions qui calculent la sévérité et la liste d'opérations conseillées traduisent des connaissances procédurales, c'est-à-dire des connaissances sur l'utilisation des outils (mesures et algorithmes) à disposition.

Les niveaux d'analyse

En général, les seuls objets géographiques représentés dans les bases de données sont les objets isolés : une route, une maison, un lac, etc… Pourtant, pour la caractérisation de l'espace géographique comme pour sa généralisation, les opérations ne sont pas forcément effectuées au niveau de ces objets simples : certaines sont effectuées sur des groupes d'objets organisés (par exemple : un groupe de bâtiments alignés le long d'une route), d'autres, sur des parties d'objets (une série de virages au milieu d'une route).

Dans le prototype AGENT, ces différents niveaux d'analyse sont explicités : le niveau le plus bas, celui des objets individuels, est appelé le niveau micro. Le niveau des groupes d'objets organisés est appelé le niveau méso. On peut ainsi expliciter le rôle des groupes d'objets identifiés comme pertinents pour la généralisation. Plusieurs niveaux méso emboîtés peuvent exister : par exemple, pour l'urbain, trois niveaux ont été identifiés comme pertinents : la ville, composée d'îlots urbains (bâtiments délimités par un cycle minimal de rues), qui sont eux-mêmes composés de bâtiments. Les bâtiments sont des agents micro, les îlots urbains et la ville des agents méso.

Les rôles du niveau méso pour la généralisation ont été décrits par [RUAS 00]. D'une part, l'agent méso est responsable des opérations de généralisation qui ont lieu au niveau du groupe (par exemple, l'élimination d'objets au sein du groupe). D'autre part, il supervise la généralisation de ses composants micro en jouant un triple rôle :

- la coordination, qui consiste à donner de l'autonomie aux agents micro avec un ordre qui se veut optimal, surtout quand d'importants effets de bord sont prévisibles ;
- le contrôle, qui a trait à la gestion des effets de bord après la généralisation des agents micro ;
- la législation, par laquelle il change les valeurs but des contraintes des objets micro, soit pour sortir d'une situation sur-contrainte, soit encore pour mieux maintenir des propriétés globales.

Ainsi, pour pouvoir superviser la généralisation de ses composants, un agent méso dispose, en plus de ses caractéristiques d'agent, de fonctionnalités supplémentaires propres à sa nature méso.

Le niveau méso peut être constitué de façon ascendante, c'est-à-dire par regroupement d'objets (regroupement de bâtiments proches pour délimiter la ville), ou de façon descendante, c'est-à-dire par segmentation (partitionnement de la ville par les rues pour déterminer les îlots urbains).

Par ailleurs, le niveau méso peut être constitué *a priori*, dans une phase d'enrichissement des données préalable à toute généralisation (c'est le cas de la ville et des îlots urbains), ou bien dynamiquement au cours de la généralisation en fonction des besoins. Par exemple : une route, agent micro, peut avoir besoin de se segmenter pour isoler les parties non lisibles des parties lisibles. Les parties deviennent alors les agents de niveau micro et la route initiale, comme « ensemble de parties de routes », devient un agent méso chargé de superviser la généralisation de ses parties. Elle disparaît et redevient agent micro après généralisation et re-connexion de ses parties.

Le moteur agent

Le moteur agent est le cœur du prototype. Il a pour fonction d'enchaîner les actions entreprises par tout agent actif au cours du « cycle de vie » qu'il exécute lorsqu'il est activé. Tout agent du système est par défaut dans un état passif. Il devient actif lorsqu'il reçoit l'ordre de s'activer. Cet ordre peut lui être donné par un agent de niveau hiérarchique supérieur, c'est-à-dire un agent méso dont il est un composant, ou, s'il est déjà un agent méso de plus haut niveau, par un gestionnaire de tâches.

Le « cycle de vie » d'un agent est schématisé dans la figure B.8.1.

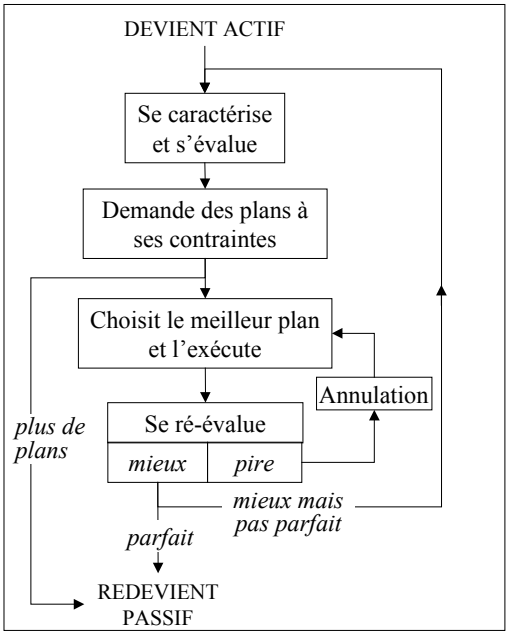


figure B.8.1 : *« cycle de vie » simplifié d'un agent*

Au cours de son cycle de vie, l'agent :

- *se caractérise et s'évalue* : il demande à chacune de ses contraintes de calculer leur valeur courante, puis leur sévérité (degré de violation), grâce aux méthodes dont elles disposent ;
- *demande des plans à ses contraintes* : il demande à chacune de ses contraintes de proposer une liste d'opérations supposées capables de faire diminuer leur degré de violation ;
- *choisit le meilleur plan et l'exécute* : il choisit parmi toutes les opérations proposées par ses contraintes, celle qui est *a priori* la plus appropriée. Ce choix est fait en deux étapes : 1/ l'agent choisit la contrainte à traiter en se basant sur les valeurs de priorité, puis de sévérité des contraintes, et 2/ il prend la première opération proposée par cette contrainte ;
- *se ré-évalue* : il demande à ses contraintes de calculer leurs nouvelles valeur courante et sévérité, et évalue l'évolution depuis l'état précédent. Le nouvel état est considéré comme meilleur que l'ancien si : 1/ la sévérité de la contrainte traitée a suffisamment diminué, et 2/ la sévérité des autres contraintes n'a pas trop augmenté ;
- si le nouvel état n'est pas considéré comme meilleur que l'ancien, l'agent annule l'opération effectuée et essaie l'opération suivante dans la liste des propositions. Si le nouvel état est considéré comme meilleur, il recommence un cycle de vie ;
- le processus s'arrête lorsque le résultat est parfait (toutes les contraintes satisfaites) ou que toutes les opérations proposées ont été essayées.

De plus, un mécanisme de stockage des états intermédiaires permet d'accepter temporairement une dégradation de l'agent, dans l'espoir d'accéder ultérieurement à une solution optimale. Ce mécanisme, appelé « hill climbing », est détaillé dans [REGNAULD 01].

Dans le cas d'un agent de niveau méso (groupe), l'une des opérations possibles peut être de rendre actif tout ou partie de ses composants micro. Dans ce cas, l'agent méso attend la fin du cycle de vie des agents micro pour continuer le sien.

Le moteur Agent est construit de façon modulaire : chacune des tâches enchaînées est un module indépendant qui constitue un maillon de la chaîne. Il est ainsi possible de faire évoluer l'un de ces modules, par exemple pour l'affiner, sans pour autant fragiliser le moteur.

Le modèle de données

Le SIG LAMPS2 sur lequel a été construit le prototype AGENT est orienté objet, et permet l'héritage multiple (une classe peut hériter de plusieurs classes de niveau plus général). Ces concepts ont été exploités pour la mise au point du modèle de données du prototype. Le modèle de données est constitué de classes génériques, qui ne contiennent pas d'objets mais des attributs et des méthodes dont les classes plus spécifiques hériteront.

Ce modèle contient :

- une classe « agent », qui porte les méthodes de caractérisation, évaluation, choix de la meilleure opération, ré-évaluation, ainsi que le « cycle de vie » (moteur) qui enchaîne ces méthodes. Cette classe « agent » est spécifiée (par héritage) en une classe « agent-micro » et une classe « agent-méso ». La classe « agent-méso » porte en plus les méthodes permettant de superviser la généralisation des agents micro ;
- une classe « contrainte » qui porte les attributs et méthodes génériques décrits dans le paragraphe consacré aux contraintes (valeur courante, sévérité, etc.) ;
- une classe « algorithmes » et une classe « mesures » qui portent respectivement, en tant que *méthodes*, les algorithmes de généralisation disponibles.

Il est à noter que le moteur agent manipule exclusivement ces classes génériques.

Les liens entre classes génériques sont les suivants :

- un lien « est composé de », de cardinalité [1-n], de la classe « agent-méso » vers la classe « agent-micro », qui permet de relier un groupe et ses parties ;
- un lien « a pour contrainte », de cardinalité [1-n], de la classe « agent » vers la classe « contraintes », qui relie l'agent géographique aux contraintes qui le guident. Ainsi, en termes d'instances, à chaque objet géographique correspondent autant d'objets « contrainte » que de caractères « à surveiller » sur l'objet.

Le lien entre les classes génériques et les classes géographiques s'opère de la manière suivante : des classes spécifiques correspondant à chaque type d'objet géographique utilisé sont définies, tant au niveau micro (routes, bâtiments, lacs…) qu'au niveau méso (îlots urbains, villes…). Les noms de ces classes sont « agent-route », « agent-îlot-urbain » etc. Elles constituent le *schéma adapté*.

Ces classes héritent respectivement des classes « micro-agent » et « méso-agent ». Les classes de la base de données utilisateur viendront se greffer par héritage sur ces classes, les objets restant au niveau des classes utilisateur. Ainsi, un objet géographique de la base de données utilisateur « devient un agent » dans le prototype parce que sa classe hérite (indirectement) de la classe « agent » du modèle de données.

Ce système permet de s'affranchir du problème du nom des classes utilisateur. Par exemple, une classe du schéma utilisateur contenant des routes, qu'elle s'appelle « roads » ou « tronçon_routier », héritera de la classe « agent-route » du schéma adapté, qui elle-même hérite de la classe « agent-micro », donnant ainsi à tous les objets routes de l'utilisateur les fonctionnalités d'un agent. Les classes du schéma adapté qui n'ont pas de correspondant dans le schéma utilisateur peuvent accueillir directement des objets créés au cours du processus de généralisation. C'est le cas, la plupart du temps, des classes d'objets méso (exemple : îlots urbains), puisqu'il est très rare que ces objets soient explicités dans les bases de données géographiques. Ces classes accueilleront les objets méso créés lors de la phase d'enrichissement des données. La figure B.8.2 présente ce mécanisme d'héritage.

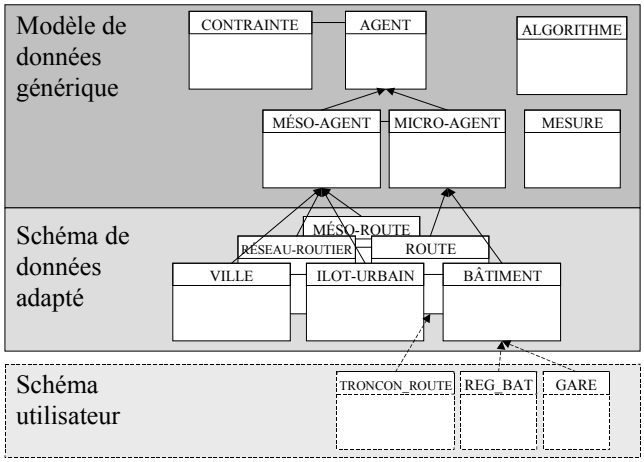


figure B.8.2 : *schéma de données du prototype AGENT (version simplifiée)*

En ce qui concerne les contraintes, les contraintes pertinentes pour chaque classe d'objets du schéma adapté sont identifiées. Chacune des contraintes sur chaque classe d'objets se traduit par une classe de contrainte spécifique, qui fait également partie du schéma adapté (classes non représentées dans la figure B.8.2). Ainsi, il existe des classes « contrainte de taille sur les bâtiments », « contrainte d'orientation sur les bâtiments », « contrainte de densité sur les îlots urbains », « contrainte de lisibilité sur les routes », etc.

Toutes ces classes de contraintes spécifiques héritent de la classe générique « contrainte ». Au niveau des objets, chaque agent géographique est lié par le lien « a pour contraintes » à un objet de chaque classe de contrainte relative à sa nature.

Les résultats du projet

Durant les trois années du projet, le travail a été décomposé selon les étapes suivantes :

- formation à la plate-forme d'accueil : Gothic de Laser-Scan ;
- réflexion et accord sur le modèle de base : le concept d'agent, les contraintes, les niveaux d'analyse, le moteur ;
- analyse des algorithmes et des mesures du niveau micro pour les routes et les bâtiments, puis codage ou transcription d'une partie de ces outils ;
- codage du moteur des agents micro ;
- premiers tests pour affiner les valeurs de contraintes et améliorer les outils et le moteur ;
- analyse des algorithmes et des mesures du niveau méso pour le réseau de routes et les îlots urbains puis codage ou transcription d'une partie de ces outils ;
- codage du moteur des agents méso ;
- premiers tests pour affiner les valeurs de contraintes et améliorer les outils et le moteur ;
- réflexion et conception de méthodes d'évaluation du prototype ;
- réalisation de tests ;
- présentation du rapport final à la Commission européenne.

Les résultats que nous présentons ici sont donc les résultats du prototype à la fin du projet. Lors des évaluations, un certain nombre de problèmes ont été identifiés et doivent donner lieu à la livraison d'une version définitive de Laser-Scan, prévue de façon contractuelle, début 2001.

Le contenu du prototype

Au niveau du prototype Agent, il est important de bien dissocier les éléments du système. Ce prototype comporte actuellement comme ci-dessous.

- Un *modèle de données* permettant de représenter l'information nécessaire à la généralisation :
  - les classes génériques d'agents micro et méso et leurs mécanismes de communication ;
  - les classes génériques de contraintes, munies des attributs (valeur courante, priorité, sévérité, importance, flexibilité, opérations conseillées) et des fonctions nécessaires au calcul de ces attributs.
- *Un moteur Agent* générique permettant de consulter l'état des contraintes, de choisir une opération conseillée, de la déclencher, d'évaluer l'état obtenu, de comparer cet état avec d'autres états intermédiaires, de valider, stocker ou invalider chaque opération, de choisir une autre opération en cas d'insatisfaction sans recalculer l'ensemble des contraintes.
- Un *schéma de données* adapté aux types d'objets que nous avons étudiés : les routes, les bâtiments, les îlots et les villes. Ces classes sont dotées des algorithmes permettant leur généralisation ainsi que des mesures et des contraintes permettant de contrôler leur généralisation.

Le prototype actuel est donc capable de généraliser des données utilisateur de même type que les données que nous avons étudiées. Il suffit pour cela de charger les classes d'un utilisateur comme sous-classes du schéma de données du prototype. Le chargement utilise la notion d'héritage.

En termes d'outils, le prototype agent dispose actuellement de vingt-cinq algorithmes de généralisation, huit algorithmes de contrôle et vingt-neuf mesures d'analyse spatiale au niveau du schéma de données :

- la classe bâtiment : dix algorithmes de généralisation et dix mesures ;
- la classe îlot : cinq algorithmes de généralisation et trois mesures ;
- la classe ville : deux algorithmes (un pour la généralisation des rues et un pour la gestion des îlots) et une mesure pour la généralisation des rues ;

- la classe routes-micro : huit algorithmes (six de généralisation et deux de découpage et d'encapsulation méso-micro) et onze mesures ;
- la classe routes-méso : quatre algorithmes de contrôle de micro routes ;
- la classe réseau-routier : quatre algorithmes (trois de généralisation et un de contrôle micro) et quatre mesures.

Dans la répartition, on peut constater qu'il y a toujours plus d'algorithmes micro que méso. Ceci s'explique, d'une part, parce que les opérations méso sont moins nombreuses (sélection/élimination, déplacement) que les opérations micro (simplification, dilatation, caricature, équarrissage, lissage) mais aussi parce que les opérations méso sont plus complexes à concevoir et à implémenter. Certains algorithmes font encore défaut même si les concepts ont été identifiés.

En l'état, le prototype Agent ne peut pas généraliser les types d'objets qui n'ont pas été étudiés. Pour pouvoir le faire, il faut ajouter des classes au schéma de données et y associer les algorithmes et les contraintes adaptés. On peut penser qu'une partie des algorithmes et des mesures seront réutilisables, mais il est clair qu'il manque encore des outils, de l'analyse et de la recherche.

Les tests d'évaluation effectués

Dans le cadre du projet, nous voulions évaluer la qualité des données généralisées et du prototype Agent.

Le domaine de l'évaluation des données a été très peu étudié en généralisation. Dans le domaine des SIG, les recherches concernent essentiellement la qualité géométrique. Or, dans le cas de la généralisation, deux questions sont fondamentales et dépassent le contrôle de la localisation géométrique : les données généralisées conservent-elles les propriétés importantes de l'espace géographique ? Ces données répondent-elles aux besoins de l'utilisateur (quantité d'information, lisibilité, etc.) ? Compte tenu de l'absence de modules de généralisation automatique, aucune méthodologie et aucun outil n'existent à ce jour pour répondre à ces deux questions.

Pour l'évaluation d'un prototype de généralisation, les principaux travaux ont été faits dans le cadre du groupe de travail de l'OEEPE sur la généralisation, mais l'objectif prioritaire était d'identifier les points faibles des systèmes, afin de les améliorer et d'étudier les séquences de généralisation pour construire de meilleures règles de généralisation [RUAS 01].

Une des étapes importantes de la phase d'évaluation du projet AGENT a donc été de mettre au point, dans un temps assez limité, quelques méthodes. La conception des méthodes importait, autant pour nous, que les résultats de l'évaluation.

Le premier test visait à évaluer la qualité des données généralisées par le prototype. Des données routières et des données urbaines ont été généralisées automatiquement et des cartographes ont commenté les résultats. Pour cela nous avons conçu une grille d'évaluation permettant de mieux interpréter les commentaires des cartographes. Ce test permet de voir si le système est capable d'obtenir de bons résultats, donc d'étudier son efficacité.

Le deuxième test consistait à tester la robustesse et la stabilité des algorithmes contenus dans le prototype. Nous nous sommes restreints à l'évaluation des algorithmes de généralisation des bâtiments. Pour cela, des échantillons de bâtiments ont été fabriqués automatiquement puis appliqués sur les algorithmes en faisant varier les valeurs paramétriques. Cette méthode permet d'identifier précisément les cas mal traités.

Le troisième test avait pour but d'évaluer les évaluations internes des agents. Lors du processus, chaque agent s'autoévalue pour accepter, conserver ou rejeter un nouvel état. Si cette évaluation n'est pas bonne (par exemple : un agent rejette un état que nous considérons comme correct ou accepte un état que nous considérons comme inacceptable), alors le système a assez peu de chances de converger vers un état satisfaisant. Nous avons numérisé des données généralisées manuellement et nous avons demandé aux agents d'évaluer ces solutions. Chaque agent devait comparer son état initial non généralisé avec l'état final numérisé.

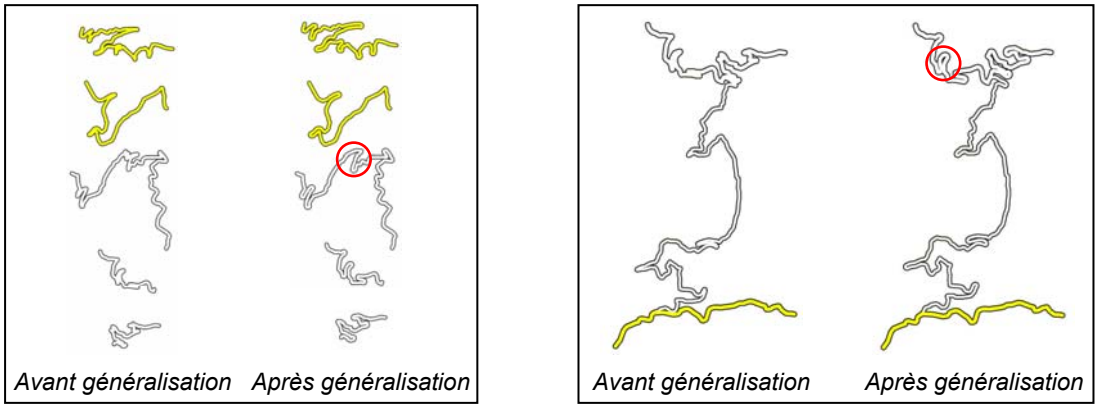
Le dernier test avait pour but d'étudier plus précisément l'efficience du système. Il s'agissait de voir si le système, compte tenu des algorithmes disponibles, était capable d'obtenir des résultats acceptables, en minimisant le nombre d'essais pour y arriver. Ce test permet d'évaluer la qualité des connaissances procédurales contenues dans le prototype. Nous avons généralisé interactivement des données avec les mêmes algorithmes qu'Agent (sur la même plate-forme), en notant les essais successifs que nous avons dû réaliser pour atteindre un état jugé satisfaisant. Puis, nous avons comparé les résultats (efficacité) et surtout le nombre d'essais successifs pour atteindre une solution (efficience).

L'ensemble de ces tests nous a permis d'identifier et surtout d'interpréter les points faibles du prototype à la fin du projet, afin de pouvoir l'améliorer. Parmi les améliorations, certaines sont simples puisqu'il ne s'agit que d'une amélioration des paramétrages, d'autres remettent en cause certains éléments contenu système (algorithme ou mesure défaillant, modification des connaissances procédurales, performance d'un algorithme). Dans ce cas, il « suffit » de corriger les points identifiés. Enfin, d'autres points sont dus à l'absence de concepts (algorithmes ou mesures de généralisation) et nécessitent la conception puis l'introduction de ces éléments. Dans les deux chapitres suivants, nous ne présenterons que la synthèse des résultats de nos tests.

Les données généralisées

Les routes

Les données sont issues de la BD CARTO (résolution décamétrique), dans la région de Romans-sur-Isère. Nous avons extrait quelques cas complexes de routes prises individuellement et en réseau, et les avons généralisées pour un affichage au 1 : 250 000. La figure B.8.3 présente les routes avant et après généralisation, à l'échelle et avec la symbolisation du 1 : 250 000.



Routes individuelles *Routes en réseau*

figure B.8.3

Données BD CARTO - routes de montagne avant et après généralisation pour une échelle de 1 : 250 000

Deux problèmes ont été identifiés, ils sont entourés sur la figure B.8.3 : une série de virages a été un peu trop simplifiée (quoique le résultat soit tout de même acceptable) et surtout, un trou dans le symbole d'une route a été créé. Un algorithme destiné à détecter et résoudre ce type de conflits est actuellement à l'étude au laboratoire COGIT. En dehors de ces deux problèmes, les résultats ont été jugés très bons : la lisibilité des routes est assurée et les intersections sont correctement traitées, ce qui prouve qu'on dispose quasiment de toutes les méthodes nécessaires à la généralisation automatique du thème routier. Il resterait toutefois à évaluer le prototype sur une zone plus étendue. Des tests très encourageants ont été menés par le projet Carto2001 sur des zones comportant plusieurs intersections complexes, mais le processus de déplacement des routes est encore trop lent pour pouvoir être testé sur des zones très étendues.

Les données urbaines

Les données urbaines soumises à l'évaluation de cartographes sont issues de la BD TOPO (résolution métrique). Il s'agit des classes routes et bâtiments de la ville de Trets (6 200 habitants), proche d'Aix-en-Provence. Ces données peuvent être symbolisées sans généralisation à l'échelle 1 : 15 000. Elles ont été généralisées pour obtenir un affichage au 1 : 50 000, similaire à celui d'une carte IGN. La généralisation a été réalisée de manière totalement automatique sur le prototype AGENT, sans retouche. L'évaluation a été faite par Gérald Weger, cartographe retraité de l'IGN et par deux cartographes de l'Ordnance Survey. La figure B.8.4 présente, affichées à l'échelle du 1 : 50 000, les données initiales avec une symbolisation pour le 1 : 15 000, les données initiales avec la symbolisation du 1 : 50 000 (ce qui fait apparaître les conflits de symbolisation), et enfin les données généralisées automatiquement avec la symbolisation du 1 : 50 000. La généralisation est considérée comme globalement bonne puisqu'elle permet une lecture correcte de l'information au 1 : 50 000 et proche d'une carte IGN au 1 : 50 000.

Données initiales, symbolisation au 1:15 000 *Données initiales, symbolisation au 1:50 000* *Après généralisation, symbolisation au 1:50 000*

figure B.8.4 *: données BD TOPO : ville de Trets - avant et après généralisation pour une échelle de 1 : 50 000*

Les principaux points faibles identifiés sont les suivants :

- *bâtiments* : souvent les formes sont encore trop détaillées, la généralisation correspond plutôt à celle d'un 1 : 25 000 et pourrait être plus poussée pour le 1 : 50 000. Les tailles des bâtiments après généralisation sont trop homogènes, elles reflètent mal la diversité initiale : les petits bâtiments pourraient être moins grossis sans que cela gêne la lisibilité. Ces deux points peuvent se corriger assez facilement par modification des connaissances introduites au niveau des contraintes sur les bâtiments (but de taille, flexibilité et importance de la conservation de forme). Quelques bâtiments n'ont pas été généralisés du tout, parce que toutes les solutions proposées ont été rejetées. Ce sont généralement des bâtiments de forme complexe pour lesquels les algorithmes disponibles ne sont pas totalement adaptés. Dans certains cas, une solution pourtant acceptable a été refusée par le système, parce que les contraintes étaient paramétrées de manière trop stricte. Les bâtiments non généralisés étant parfaitement recensés par le système, ils peuvent être généralisés en post-traitement de manière interactive. Quelques bâtiments importants du point de vue sémantique ont été supprimés par manque de place. Pour éviter ce type de problème, il faudrait mieux prendre en compte la sémantique pour l'élimination de bâti, et ajouter dans le prototype, un algorithme de déplacement de rues de manière à élargir l'espace disponible autour d'un bâtiment important lorsque c'est possible, et un algorithme d'érosion qui permettrait de diminuer la taille de tels bâtiments pour les conserver même dans un espace réduit. Enfin les structures de bâtiments remarquables (alignements par exemple) sont mal préservées. Ce dernier point est dû à l'absence d'outil de détection de telles structures dans le prototype ;

- *rues* : trop d'impasses sont conservées, alors qu'elles sont peu importantes et que leur élimination libérerait de la place pour les bâtiments. L'explication est un mauvais paramétrage de l'algorithme d'élimination de rues. En revanche le centre-ville est bien généralisé ;

- *rues et bâtiments* : quelques cas de superposition entre rues et bâtiments apparaissent. L'ajout d'un algorithme de déplacement de rues permettrait de résoudre ce problème. Par ailleurs, les bâtiments sont parfois placés trop près des bords de rues. Ils devraient respecter la distance minimale (seuil de séparabilité), ou alors être accolés au symbole de rue. Il s'agit juste d'un problème de paramétrage.

La plupart des points soulevés sont dus à des problèmes de réglage. Quelques algorithmes sont encore manquants (érosion de bâtiments, déplacement de rues, détection et typification de groupe de bâtiments remarquables). Nous considérons ces résultats comme satisfaisants.

Il a également été demandé aux cartographes d'évaluer les conflits subsistant avec les thèmes non traités (autres que routes et bâtiments). Il s'avère que le thème principal posant problème en zone urbaine est l'hydrographie (linéaire et ponctuelle), la prise en compte de ce thème conjointement au bâti et aux routes nécessite des travaux de recherche plus approfondis.

Le prototype

Les informations récoltées lors des différents tests nous ont permis de qualifier l'état du prototype à la fin du projet sur un ensemble de critères :

- *type de données traitées* : le prototype actuel est capable de généraliser un réseau routier à moyenne échelle et des villes ;
- *efficacité* : au niveau urbain, la solution obtenue est considérée comme globalement proche de ce qu'on peut obtenir en généralisation manuelle. Les limites actuelles sont essentiellement dues à un paramétrage à améliorer tant au niveau des contraintes que des valeurs paramétriques de certains algorithmes. Au niveau routier, le résultat a été considéré comme très satisfaisant ;
- *efficience* : pour la généralisation urbaine, le système fait beaucoup plus d'essais qu'un expert connaissant la plate-forme. Certaines connaissances procédurales sont donc à revoir. Au niveau routier, le nombre d'essais est équivalent ;
- *robustesse* : l'analyse faite sur les algorithmes de généralisation des bâtiments montre que quelques algorithmes traitent mal des cas particuliers. Ces algorithmes sont à corriger. On peut penser que pour les autres algorithmes, quelques erreurs de codage subsistent également ;
- *stabilité* : l'analyse faite sur les algorithmes de généralisation des bâtiments montre que deux algorithmes sont sensibles à l'orientation des bâtiments. Là aussi, il semblerait que quelques erreurs subsistent et sont à corriger ;
- *flexibilité* : la flexibilité est excellente. L'organisation modulaire du système permet d'introduire de nouveaux algorithmes, de nouvelles mesures, de nouvelles classes et même de modifier le moteur sans fragiliser l'ensemble du prototype agent ;
- *ergonomie* : l'ergonomie est le point le plus faible du prototype. Actuellement, seuls des experts sont capables de l'enrichir.
- *temps et volume* : à la fin du projet, le prototype n'est pas optimisé. Certaines opérations (dont le déplacement du réseau routier) sont trop longues. La version promise par Laser-Scan, courant 2001, doit corriger une partie de ces problèmes. Au niveau volume de données, Agent a pu généraliser la ville d'Aix-en-Provence.

À propos des composants du système, nos conclusions sont les suivantes :

- *algorithmes manquants* : il manque actuellement un algorithme de déplacement local entre bâtiments, un algorithme de déplacement entre rues, un algorithme d'érosion de bâtiments, un algorithme de structuration des groupes de bâtiments ;
- *contraintes manquantes* : il manque une contrainte de maintien des formes des bâtiments, une contrainte de granularité des routes, une contrainte de maintien des structures de bâtiments ;
- *buts et sévérité* : la contrainte de densité des bâtiments devrait dépendre d'une classification urbaine pour mieux maintenir le caractère de la ville. De façon générale, certaines valeurs de contraintes devraient être calculées dynamiquement afin de mieux maintenir le caractère des objets géographiques ;
- *évaluation* : le système est parfois surcontraint ce qui l'empêche d'accepter certaines solutions. Il faudrait modifier le prototype en distinguant davantage : 1/ les mesures pour choisir une opération et : 2/ les mesures pour évaluer les solutions ;
- *concepts Agent* : il manque l'implémentation des « macro agents » qui permettraient de représenter les contraintes sur les populations d'objets. La généralisation d'espaces hétérogènes demande l'introduction de plus d'interactions entre agents. Une amélioration significative serait d'introduire des agents chargés d'un apprentissage dynamique.

Conclusion

Un nouveau prototype de généralisation

En termes de recherche, les résultats du projet AGENT sont tout à fait satisfaisants puisque le modèle supposé à base de contraintes, d'agents et de niveaux d'analyse fonctionne pour généraliser automatiquement des données géographiques [RUAS 99]. Cela signifie, avant tout, que la direction n'était ni absurde ni infaisable. Parmi les points forts, on peut noter qu'il nous a toujours été possible de faire évoluer la plate-forme en intégrant du code développé sur différents sites, ce qui prouve la flexibilité du prototype proposé.

Nous avons pu constater, de plus, que les fonctionnalités de la plate-forme Gothic de Laser-Scan étaient adaptées (concept objet, large bibliothèque de fonctions géométriques et topologiques). Certains aspects dont le découpage dynamique méso-micro pour les routes [DUCHENE 01] [BARRAULT, WEIBEL 01] et la gestion des arbres d'états pour le choix de la meilleure solution [REGNAULD 01] sont tout à fait innovants et améliorent la qualité du prototype et des résultats.

Au niveau algorithmique, faute de temps, nous n'avons pas pu coder tous les algorithmes que nous aurions souhaité intégrer et certaines mesures ne sont pas assez robustes ou sensibles. Il conviendrait, pour ces cas, de remplacer des mesures et d'intégrer de nouveaux outils. De même, un soin serait à apporter pour améliorer certaines connaissances procédurales codées un peu trop rapidement.

Les perspectives de mise en production

Le protype Agent est actuellement utilisé par le projet Carto2001 pour généraliser les données BD CARTO pour obtenir une carte au 1 : 100 000. La version actuelle est encore celle du projet et non la version optimisée que doit livrer Laser-Scan. Tel quel, et comme nous l'avons souligné ci-dessus, le prototype ne répond pas à tous les besoins du projet. Si le modèle de base est bien adapté, par contre, le schéma Agent est incomplet puisque la BD CARTO comporte plus de types de données que ce qui a été étudié dans le projet. Ainsi, les carrefours, les rivières, l'occupation des sols n'ont pas été étudiés.

Il faut donc bien voir ce prototype comme un outil sur lequel des développements doivent être faits pour l'adapter aux besoins. Dans le cas de problèmes complexes (comme par exemple : une bonne sélection d'un réseau hydrographique), des efforts de recherche doivent être poursuivis. Dans la version définitive, il est prévu la possibilité d'utiliser également les algorithmes en interactif ce qui permettra de pallier dans un premier temps aux manques de la plate-forme.

Mais l'ambition réelle dans une optique de production est d'aller vers un système beaucoup plus riche que celui actuellement disponible. En toute théorie, et si des efforts de recherche et de collaboration sont poursuivis, la philosophie Agent doit permettre l'automatisation de la fabrication de produits dérivés des bases de données. Il sera ainsi envisageable, par exemple, de dériver la BD CARTO de la BD TOPO mise à jour, de réaliser des 1 : 50 000 à partir de la BD TOPO ou de faire des produits à la carte, c'est-à-dire de s'adapter aux besoins de chaque utilisateur.

Les perspectives de recherche

Dans une optique de recherche, ce prototype nous permet de rassembler les concepts et les algorithmes sur un même SIG, apte à gérer un volume important de données. À partir de là, il nous est possible d'attaquer de nouvelles recherches que nous pouvions difficilement mener auparavant.

Le concept d'agents doit être avant tout complété pour mieux gérer les interactions entre objets de nature différente. Dans le prototype actuel c'est la relation méso-micro qui permet d'activer des opérations contextuelles. En fait, la solution choisie s'adapte bien à des ensembles d'objets homogènes, tels que des ensembles de bâtiments ou un réseau de routes ou de rues. Mais la réalité géographique est parfois bien différente et il faut que nous parvenions à traiter des conflits existant entre des routes, des bâtiments, des rivières et des voies ferrées. La thèse de Cécile Duchêne s'inscrit dans cette démarche en introduisant les idées d'interaction et de négociation entre agents.

De même, la thèse en cours de Sébastien Mustière nous a fait progresser dans nos connaissances sur les méthodes d'apprentissage, que nous envisageons d'utiliser pour consolider les connaissances contenues dans le système. Actuellement, les règles sont empiriques et ne permettent pas d'obtenir des résultats excellents. Pour cela, il nous faudrait ajouter le concept d'agents d'apprentissage qui pourraient dynamiquement améliorer les choix faits par le système afin d'assurer une meilleure convergence vers une bonne solution. Cette piste est encore à explorer.

Enfin, la thèse de Sylvain Bard sur l'évaluation des données généralisées devrait permettre de disposer d'agents d'évaluation qui permettraient de directement qualifier la qualité des données généralisées selon un ensemble de critères. Cette thèse, débutée en octobre 2000 devrait aussi nous permettre dévaluer la pertinence des mesures dont nous disposons et de les améliorer.

Pour étendre le champ d'application de la généralisation et donc aller vers la généralisation de base de données « à la carte », il paraît indispensable de continuer les recherches et la collaboration internationale, d'enrichir les bibliothèques d'algorithmes et de mesures, et d'intégrer et de prendre en compte de nouvelles informations tel que le relief.

Références

[BARILLOT 99] X. Barillot : *Généralisation automatique du linéaire : étude de la courbure pour analyser la forme des routes,* ACI'99, Ottawa (Canada), laboratoire COGIT, IGN-SR 990050/S-COM, 1999.

[BARRAULT, WEIBEL 01] M. Barrault & R Weibel : *Road network generalisation : a framework using a multi-agent system approach,* in Proceedings of the 9th GISRUK conference, Glamorgan (Pays de Galles), 2001 (à paraître).

[BOFFET 00] A. Boffet : *Creating urban information for cartographic generalisation,* International Symposium on Spatial Data Handling, SDH'2000, Pékin (Chine), laboratoire COGIT, IGN-SR 00-046/S-COM-AB, 2000.

[FERBER 95] J. Ferber : *Les systèmes multi-agents,* InterEditions, 1995.

[FRITSCH 97] E. Fritsch : *Représentations de la géométrie et des contraintes cartographiques pour la généralisation du linéaire routier,* thèse de Doctorat de l'Université de Marne-la-Vallée, spécialité : Sciences de l'Information Géographique, soutenue le 12 décembre 1997, laboratoire COGIT, IGN-SR 970008/S-THE, 1997.

[HANGOUËT 98] J.-F. Hangouët : *Approche et méthodes pour l'automatisation de la généralisation cartographique ; application en bord de ville,* thèse de doctorat de l'Université de Marne-la-Vallée, soutenue le 24 novembre 1998, laboratoire COGIT, IGN-SR 980011/S-THE, 1998.

[LAMY et al 99] S. Lamy, A. Ruas, Y. Demazeau, M. Jackson, W.A. Mackaness & R. Weibel : *The Application of Agents in Automated Map Generalisation*, in Proceedings of 19th International Cartographic Conference, Ottawa (Canada), vol. 2, pp. 1225-1234, laboratoire COGIT, IGN-SR 990040/S-COM, 1999.

[LECORDIX et al 97] F Lecordix, C. Plazanet and J.-Ph. Lagrange : *Platform for Research in Generalization (a) : Application to Caricature*, in GeoInformatica International Journal, vol. 1, n° 2, pp. 161-182, 1997, laboratoire COGIT, IGN-SR 970022/S-ART, 1997.

[MONIER 97] P. Monier : *Caractérisation du terrain en vue de son traitement numérique. Application à la généralisation de l'orographie,* thèse de Doctorat Université Louis Pasteur, Strasbourg (F), spécialité : Sciences de l'Information Géographique, laboratoire COGIT, IGN-SR 970001/S-THE, 1997.

[MUSTIÈRE et al 00] S. Mustière, J.-D. Zucker and L. Saitta : *Abstraction et Changement de Langage pour Automatiser la Généralisation Cartographique,* in Actes du 11ème congrès Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle (RFIA), Paris (F), février 2000, volume I, pp. 411-418, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-051/S-COM-SM, 2000.

[PLAZANET 96] C. Plazanet : *Enrichissement des bases de données géographiques : analyse de la Géométrie des objets linéaires pour la généralisation cartographique. Application aux routes,* thèse de doctorat de l'Université de Marne-la-Vallée, spécialité **:** Sciences de l'Information Géographique, laboratoire COGIT, IGN-SR 960017/S-THE, soutenue le 3 octobre 1996.

[REGNAULD 01] N. Regnauld : *Constraint based mechanism to achieve automatic generalisation using an agent modelling,* in Proceedings of the 9th GISRUK conference, Glamorgan (Pays de Galles), 2001 (à paraître).

[REGNAULD 98] N. Regnauld : *Généralisation du bâti : structure spatiale de type graphe et représentation cartographique,* thèse de Doctorat Université de Provence - Aix-Marseille 1, spécialité : Informatique, laboratoire COGIT, IGN-SR 980010/S-THE, soutenue le 11 mai 1998.

Publications

[DUCHÊNE 01] C. Duchêne : *Road generalisation using agents,* in Proceedings of the 9thGISRUK Conference, Glamoran (Pays de Galles), laboratoire COGIT, IGN-SR 01-001/S-COM-CD, 2001 (à paraître).

[RUAS 01a] A. Ruas : *Automating the derivation of geographical data : the age of maturity ?* ACI'2001, Pékin (Chine), laboratoire COGIT, IGN-SR 01-002/S-COM-AR, 2001 (à paraître).

[RUAS 01b] A. Ruas : *Automatic generalisation project : learning process from interactive generalisation,* rapport OEEPE, laboratoire COGIT, IGN-SR 01-003/S-RAP-AR, 2001 (en cours de publication).

[RUAS 00] A. Ruas *The role of meso objects for generalisation,* in Proceedings of the International symposium on Spatial Data Handling (SDH), Pékin (Chine), 200, 3b.50, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-053/S-COM-AR, 2000.

[RUAS 99] A. Ruas : *Modèle de généralisation de données géographiques à base de contraintes et d'autonomie,* thèse de Doctorat de l'Université de Marne-la-Vallée (France), spécialité : Informatique et Sciences de l'Information Géographique, laboratoire COGIT, IGN-SR 990009/S-THE, soutenue le 9 avril 1999.

[RUAS 98] A. Ruas : *First results on the OEEPE test on generalisation,* in OEEPE Newsletter, 1998, vol. 1, laboratoire COGIT, IGN-SR 980004/S-ART, 1998.

B.9 Un exemple de traitement de séries temporelles de positions d'instrument géodésique

Patrick Sillard (laboratoire LAREG), Serge Botton et Didier Bouteloup (CPRAG, IGN, ENSG)

Introduction

La géodésie est la discipline de la mesure des formes de la Terre. Le système Terre est complexe : des mouvements séculaires comme la tectonique aux déformations catastrophiques comme les glissements de terrain, en passant par les déformations périodiques comme les marées, tout le spectre spatio-temporel est balayé. D'une mesure locale et statique, la géodésie est passée en un peu plus d'une décennie à des mesures quasi-continues de positions d'instruments, et ce dans une perspective globale. L'analyste est donc généralement confronté à des données de nature fondamentalement nouvelle pour lui.

La statistique d'une série temporelle ne peut, en dehors d'hypothèses très restrictives qui seront décrites plus loin, s'analyser comme la succession de positions indépendantes les unes des autres. La physique du signal et le traitement de l'observation géodésique de base (phase, doppler, distance) génèrent des séries temporelles de paramètres qui sont liés dans le temps. L'analyse qui s'appuiera sur ces paramètres (le plus souvent des positions successives d'instruments) devra tenir compte de la corrélation générée par le traitement et la physique du signal, faute de quoi le résultat de l'analyse peut être gravement erroné, notamment en ce qui concerne l'estimation de la précision.

Par exemple, considérons une suite de variables aléatoires $(\tilde{x}_i)_{1\le i\le n}$ (les variables aléatoires seront notées dans ce texte avec un tilde ou un chapeau). Dans ce dernier cas, il s'agira d'estimateurs. On pourra imaginer qu'il s'agit des altitudes successives d'un instrument géodésique. Admettons que l'on recherche une estimation de la moyenne μ de la suite de variables en considérant que chacune de ces variables est indépendante de variance σ^2.

Un estimateur de μ est donné par $\hat{\mu} = \frac{1}{n}\sum \tilde{x}_i$. Sa variance est σ^2/n. Supposons maintenant que ces variables sont corrélées, de telle sorte que $\mathrm{corr}(\tilde{x}_i, \tilde{x}_j) = \begin{cases} 1 \text{ si i = j} \\ \rho \text{ si } |\text{j - i}| = 1 \\ 0 \text{ sinon} \end{cases}$. Dans ce cas, $\hat{\mu}_c = \frac{1}{n}\sum \tilde{x}_i$ reste un estimateur sans biais de μ, mais sa variance est modifiée en $\mathrm{var}(\hat{\mu}_c) = \frac{\sigma^2}{n}\left(1 + 2\rho(1 - 1/n)\right)$.

On constate qu'une corrélation peut engendrer, soit un surcroît d'information -si $\rho < 0$ alors $\mathrm{var}(\hat{\mu}_c) < \mathrm{var}(\hat{\mu})$ -, soit un déficit d'information -si $\rho > 0$-. Contrairement à une idée largement répandue, un lien entre variables aléatoires peut éventuellement donner lieu à des estimateurs plus précis qu'en l'absence de lien.

Quoi qu'il en soit, la connaissance de la corrélation est un élément essentiel de l'estimation.

Une branche des statistiques théoriques est consacrée à l'étude des processus aléatoires indicés dans le temps : on les appelle des processus stochastiques. De façon générale, $(\tilde{x}(t))_{t\in I}$ est un processus stochastique signifie que pour tout t, $\tilde{x}(t)$ est une variable aléatoire. Dans la pratique, on dispose de suites de réalisations, c'est-à-dire que pour chacune des variables aléatoires, $\tilde{x}(t)$ pour t fixé, on ne dispose que d'une seule réalisation à chaque instant.

L'analyse statistique se nourrit de redondance, de sorte que des hypothèses complémentaires sont nécessaires pour asseoir cette redondance. Concrètement, ces hypothèses porteront sur la densité de probabilité conjointe des variables $\tilde{x}(t_1)$ et $\tilde{x}(t_2)$ pour $t_1, t_2 \in I$.

De nombreux travaux ont été engagés en vue de déterminer des indicateurs permettant d'inférer d'un ensemble de réalisations la loi du processus. Ces travaux ont été menés essentiellement pour les besoins de l'économétrie afin de prédire les comportements de variables économiques. La prédiction s'appuie, en général, sur les corrélations décelables dans la série, en ayant pris soin de construire à partir de la série originale une série stationnaire, c'est-à-dire une série correspondant à un processus dont la loi est « ajustable en moyenne ».

La loi conjointe des variables $\tilde{x}(t_1)$ et $\tilde{x}(t_2)$ issues d'un processus stationnaire ne dépend que de $|t_1 - t_2|$.

Le passage d'un processus non stationnaire à un processus stationnaire est très délicat. On reviendra sur ce point dans le paragraphe consacré aux processus stochastiques.

En géodésie - géophysique, l'analyse des séries temporelles a déjà été identifiée comme un problème délicat et digne de considération. On peut citer principalement [WYATT 89], [AGNEW 92], [ZHANG et al 97], [LANGBEIN, JOHNSON 97] et [MAO et al 99]. Les trois derniers ont étudié des séries temporelles GPS afin d'identifier l'information réellement contenue dans ces données. Les résultats obtenus par ces auteurs restent assez discutables comme on le verra dans la suite de ce texte.

En dehors des études de déformations pour la géophysique, la compréhension du bruit de mesure et de traitement des signaux GPS peut aussi présenter un intérêt certain pour la métrologie géodésique. Aujourd'hui, les techniques utilisées pour la surveillance en continu d'ouvrages d'art reposent sur des observations de théodolites automatiques couplés à des distancemètres.

Ces outils donnent une précision bien supérieure au GPS sur de très courtes distances (près d'un centimètre pour GPS contre quelques dixièmes de millimètres pour des techniques topométriques à quelques dizaines de mètres). Toutefois, ces techniques ne permettent pas d'atteindre un échantillonnage à 1s, alors que le GPS le permet. Généralement, la période d'échantillonnage minimale pour les techniques classiques et de l'ordre de la minute. Par ailleurs, il est très probable que le signal GPS soit perfectible et conduise par une analyse fine, à des précisions nettement plus favorables pour la métrologie que celles annoncées plus haut.

La présente étude s'est développée précisément dans un contexte métrologique. L'objectif premier consistait à calibrer la stabilité de la monumentation utilisée pour le réseau d'orbitographie DORIS. En effet, le système de positionnement DORIS est basé sur un réseau de stations de poursuite déployée par l'IGN. Le système, conçu initialement pour l'orbitographie fine de satellites altimétriques (Topex-Poseïdon, aujourd'hui JASON), apporte désormais une information importante sur les positions des stations de poursuite. En matière de positionnement, il reste toutefois en deçà des performances du système GPS (quelques millimètres en erreur moyenne pour quelques centimètres pour DORIS dans l'ITRF2000).

L'une des justifications de ces écarts pourrait résider dans l'instabilité de la monumentation DORIS (cf. figure B.9.1) : les antennes sont généralement placées au sommet de mâts soutenus par haubans. Ces mâts sont parfois sur la toiture de bâtiments. La monumentation DORIS a donc été reproduite sur le toit de l'ENSG (cf. § suivant) munie au sommet d'une antenne GPS. Les mouvements du mât sont rapportés à la station GPS permanent du RGP de Marne-la-Vallée, également située sur le toit.

figure B.9.1 *: la balise DORIS de Kerguelen*

L'objectif de cette expérience est double :

- calibration de la stabilité de la monumentation DORIS ;
- étude des possibilités offertes par GPS pour la détermination des mouvements à très haute fréquence observés sur de très courtes ligne de base (problématique de géodésie métrologique).

Dans un premier paragraphe, l'expérience et le traitement des observations GPS en vue de l'obtention d'une série temporelle de positions sont décrits. Puis, on revient sur quelques éléments théoriques relatifs aux processus stochastiques, pour finalement aboutir aux résultats de l'analyse de la série temporelle des positions du sommet du mât obtenus par GPS.

Traitement d'une position GPS obtenue par analyse cinématique temps-réel

Présentation de l'expérience

Afin de tester dans le temps la stabilité des supports d'antenne DORIS, un support de ce type a été installé au sommet d'un pilier géodésique sur la terrasse de l'ENSG en novembre 2000.

Ce choix regroupe plusieurs avantages :

- installation facile ;
- possibilité de laisser l'installation en permanence sans risques de dégradations ;
- proximité de la station GPS permanente du RGP de Marne la Vallée (10 m).

La surveillance en continue des mouvements du mât DORIS peut se faire par différentes méthodes. Le choix s'est porté, dans un premier temps sur le système spatial GPS, dans un deuxième temps, une étude de topométrie optique permettra de vérifier les différents résultats. Une antenne a été fixée au sommet d'un mât de type DORIS, celle-ci est connectée à un récepteur GPS qui enregistre en permanence depuis fin novembre 2000, les signaux provenant des satellites de la constellation GPS.

figure B.9.2

La station expérimentale sur le toit de l'ENSG à Marne-la-Vallée.
On aperçoit, au premier plan, la station permanente du RGP à laquelle sont rapportés les mouvements du mât.

Afin d'obtenir la meilleure précision possible, l'antenne choisie pour cette expérience est une DORNE MARGOLIN. Cette antenne réputée très précise équipe toutes les stations du réseau de l'IGS (International GPS Service for Geodynamic), de l'EPN (EUREF Permanent Network) et du RGP (Réseau GPS Permanent Français), en particulier Marne la Vallée. Le récepteur connecté à cette antenne est un Ashtech Z18 bifréquence.

Les mâts DORIS sont constitués d'éléments en tubes d'acier galvanisés de forme triangulaire d'un mètre de haut (voir figures B.9.1 et B.9.2). Il est possible de superposer jusqu'à trois éléments afin d'élever l'antenne à trois mètres au-dessus du sol et ainsi de réduire les masques. Dans une configuration normale d'utilisation, le mât est scellé dans le sol à l'aide de trois tire-fonds et haubané par trois câbles en acier inoxydable.

Dans notre cas, pour des raisons logistiques, deux éléments ont été vissés solidement sur l'un des piliers en béton de la Terrasse puis haubanés par trois câbles. L'ensemble du matériel a été mis à disposition par Hervé Fagard, responsable de la Division des Réseaux Mondiaux au sein du Service de Géodésie et Nivellement (SGN) et Philippe Nicolon, en charge du RGP au laboratoire LAREG. L'antenne GPS a été placée au sommet du mât.

Observations et calculs GPS

Afin de détecter des mouvements à haute fréquence, la fréquence d'acquisition des données GPS a été fixée à une seconde. Le service du RGP offre aux utilisateurs les enregistrements effectués par les stations permanentes, dont Marne-la-Vallée.

En ce qui concerne cette dernière, la fréquence d'acquisition de la mesure est la seconde. Elle est donc compatible avec l'objectif de l'expérience décrite dans cet article. Ces données sont utilisées pour calculer la ligne de base entre la station du RGP et le sommet du mât.

Le choix du logiciel de traitement GPS s'est porté sur GEOGENIUS. Ce logiciel commercial indépendant d'un constructeur de matériel est capable de traiter les observations de nombreux récepteurs GPS en les intégrant directement en format constructeur ou en RINEX. Il est issu d'un logiciel de recherche développé par l'Université militaire de Munich. Il dispose de nombreuses options de calcul qui permettent de réaliser des traitements optimaux pour l'expérience.

La position est obtenue par le traitement de la base MLVN (station permanente - mat DORIS) d'une longueur d'environ neuf mètres. Les traitements se font en mode cinématique avec fixation des ambiguïtés entières « en vol » (OTF*, on the fly*) pour des sessions d'une heure. Le logiciel fixe les ambiguïtés en utilisant quelques minutes d'observations, puis, calcule pour chaque époque de mesure, une position tridimensionnelle (coordonnées géographiques
(λ,φ, h)).

Chaque jour d'observation, donne lieu à vingt-quatre fichiers d'une heure soit 86 400 positions traitées. C'est à partir de ces données que sont réalisées les analyses de déformations du mât. Cette expérience décrite, il convient désormais de s'atteler à l'analyse des positions obtenues. Revenons auparavant sur quelques éléments théoriques relatifs aux séries temporelles.

Quelques éléments sur les processus stochastiques

On appelle processus stochastique toute suite de variables aléatoires $(\tilde{x}(t))_{t\in I}$. Le principe de base en statistique est de dériver d'échantillons (c'est-à-dire d'un ensemble de réalisations de variables aléatoires) de nouvelles variables dont les propriétés asymptotiques (lorsque la taille de l'échantillon croit indéfiniment) permettent de reconstituer les lois caractérisant l'échantillon.

En d'autres termes, la « science » statistique est bâtie sur des considérations asymptotiques, finalement sur la redondance de l'information.

Dans le cas de processus stochastiques, il y a redondance lorsque les propriétés de $\tilde{x}(t)$ sont voisines de celles de $\tilde{x}(t')$. Sans hypothèse sur le lien de $\tilde{x}(t)$ et $\tilde{x}(t')$, il n'y a pas de redondance. Si on ne connaît pas la forme explicite de $\mathrm{E}(\tilde{x}(t))$ en fonction du temps (E désigne l'espérance mathématique), ou si on ne connaît pas celle de $\mathrm{E}(\tilde{x}(t)^2)$, il faut revenir à des considérations plus générales sur le processus.

La propriété qui permet de travailler avec un processus stochastique est la stationnarité : $(\tilde{x}(t))_{t\in I}$ est (faiblement) stationnaire lorsque $\mathrm{E}(\tilde{x}(t))$ ne dépend pas du temps et $\mathrm{cov}[\tilde{x}(t),\tilde{x}(t+\tau)]$ ne dépend que de τ. En l'absence de telles hypothèses, si l'on ne connaît pas la forme explicite de la loi de $\tilde{x}(t)$ en fonction de t, alors rien n'est possible.

Dans le cas du traitement des signaux GPS, la forme explicite du signal n'est pas connue : on ne connaît ni les mouvements du mât, ni la dépendance de la détermination d'un instant sur l'autre. Il faudra donc revenir à une hypothèse de stationnarité.

Les processus stationnaires

Soit $(\tilde{x}(t))_{t\in I}$ un processus stochastique. On appelle la fonction $\mathrm{R}(\tau,t)=\mathrm{E}(\tilde{x}(t)\tilde{x}(t+\tau))$ la fonction d'autocovariance de $\tilde{x}$. Cette fonction ne dépend que de τ dans le cas d'un processus stationnaire.

Elle joue un rôle primordial dans l'analyse des processus stochastiques, de même que son homologue, la fonction d'autocorrélation définie par : $\Gamma(\tau)=\dfrac{\mathrm{R}(\tau)}{\mathrm{R}(0)}$.

Supposons que l'on dispose d'un échantillon $(\tilde{x}_1,\ldots,\tilde{x}_n)$ de réalisations d'un processus stochastique.

Il est aisé de construire un estimateur de Γ par (on suppose sans perte de généralité) que :

$$\mathrm{E}(\tilde{x}(t)) = 0\ ) : \hat{\Gamma}_n(\tau) = \frac{\frac{1}{n-\tau}\sum_{i=1}^{n-\tau}\tilde{x}_i\tilde{x}_{i+\tau}}{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\tilde{x}_i^2}.$$

Sous des hypothèses d'ergodicité qui sont assurées pour des processus suffisamment réguliers [PAPOULIS 91], $\hat{\Gamma}_n(\tau) \xrightarrow{n\to\infty} \Gamma(\tau)$. La fonction d'autocorrélation contient une fraction essentielle de l'information relative à la structure du processus.

De son analyse découlera :

- la confirmation (ou l'infirmation) de la nature stationnaire du processus ;
- l'estimation de la loi du processus.

Pour le deuxième objectif précité, on dispose de deux types d'outils complémentaires : l'un est essentiellement qualitatif - la densité spectrale de puissance - et l'autre est plus quantitatif - la décomposition ARMA.

La densité spectrale

On appelle densité spectrale de puissance (DSP) la transformée de Fourier de l'autocovariance :

$$\mathrm{F}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \mathrm{R}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau .$$

Cette fonction, lorsqu'elle existe contient la même information que l'autocorrélation. Il s'agit simplement d'une représentation différente de la même information. On a coutume de caractériser la nature des processus par la forme de la densité spectrale et en fonction de la fréquence dominant la transformée de Fourier $\mathrm{F}(\omega)$.

***table B.9.1** : caractérisation des processus stochastiques d'après Rutman (1978)*

$\mathrm{F}(\omega)$	appellation
$1/\omega^2$	marche aléatoire
$1/\omega$	bruit de Flicker
1	bruit blanc

L'une des faiblesses de la densité spectrale est qu'elle ne donne pas de renseignement sur la stationnarité de la série : considérons un processus stochastique défini par : $\left(\tilde{x}(t) = \tilde{a}t \text{ où } \tilde{a} \to N(\dot{a},\sigma)\right)_{t\in I}$.

Cet exemple correspond, à peu de chose près, à la situation qui se produit dans l'analyse de série temporelle de positions géodésiques : on dispose de positions successives et l'on ôte une tendance estimée par régression linéaire du nuage de positions. Dans le cas où l'on a ôté la tendance, $\dot{a} = 0$, mais l'incertitude de l'estimateur demeure.

Le processus défini plus haut n'est pas stationnaire, même lorsque $\dot{a} = 0$ puisque, en dépit du fait que : $\mathrm{E}(\tilde{x}(t)) = 0 \times t = 0$, $\mathrm{cov}(\tilde{x}(t),\tilde{x}(t+\tau)) = t(t+\tau)\sigma^2$, laquelle dépend de *t*.

Supposons que l'on dispose du signal sur un intervalle [- T,T]. En pratique, cette situation se produit couramment. Dans ce cas, on montre qu'en moyennant l'information sur le support [- T,T],

$$\begin{cases} \hat{\mathrm{R}}(\tau) = \frac{1}{2T}(\dot{a}^2+\sigma^2)\int_{-T}^{T} t(t+\tau)dt = (\dot{a}^2+\sigma^2)\left(\frac{T^2}{3} - \frac{\tau^2}{4}\right) \\ \hat{\mathrm{F}}(\omega) = (\dot{a}^2+\sigma^2)\left[\frac{T}{12}\frac{\sin\omega T}{\omega} - \frac{\cos\omega T}{2\omega^2} + \frac{\sin\omega T}{2T\omega^3}\right] \end{cases}$$

On en déduit, au vu de la densité spectrale et en ayant supposé avoir traité un signal stationnaire, que le processus semble caractérisé par la présence d'un bruit blanc ($\mathrm{F}(\omega) \xrightarrow{\omega\to 0\approx} (\dot{a}^2+\sigma^2)\left[T^2/4\right]$, alors qu'en fait le signal n'est pas stationnaire (cf. figure B.9.3).

L'élément clé pour caractériser la non stationnarité du signal est la très lente décroissance de l'autocorrélation. La densité spectrale est assez souvent utilisée en physique, mais assez peu en économétrie en raison de son caractère essentiellement qualitatif et des erreurs d'interprétation qu'elle peut engendrer.

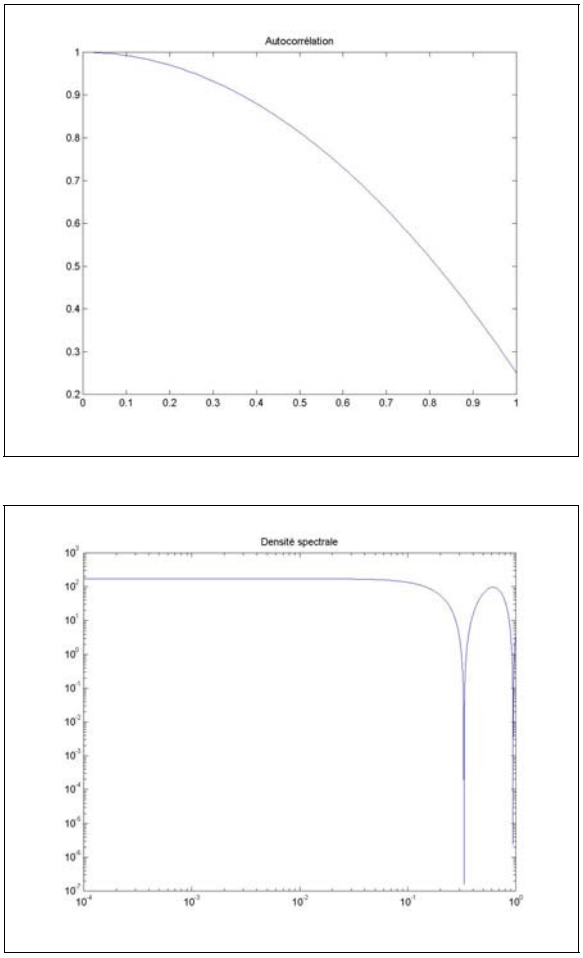


***figure B.9.3** : autocorrélation et densité spectrale du signal précédent*

Les processus ARMA

Il existe une alternative à la densité spectrale pour représenter un processus stationnaire. Wold (1938) a montré que, sous certaines conditions de régularité, tout processus stationnaire $(\tilde{x}(t))_{t\in I}$ pouvait se décrire par une forme polynomiale finie :

$$\Phi(\mathrm{B})\tilde{x}_n = \Psi(\mathrm{B})\tilde{\varepsilon}_n \qquad (1)$$

où B est l'opérateur retard ($\mathrm{B}x_n = x_{n-1}$), Φ et Ψ sont des polynômes de degré fini, et $\tilde{\varepsilon}_n$ est un bruit blanc (i.e. $\Gamma(\tau) = 0$ pour tout $\tau \neq 0$). Le processus $\Phi(\mathrm{B})\tilde{x}_n$ est un processus auto-régressif (AR) d'ordre p, où p est le degré du polynôme Φ ; $\Psi(\mathrm{B})\tilde{\varepsilon}_n$ est un processus moyenne-mobile (MA) d'ordre q, où q est le degré du polynôme Ψ. Le processus décrit en (1) est un ARMA(p,q).

Par convention, $\phi_0 = 1$ et $\psi_0 = 1$. Moyennant quoi, on montre que le processus répondant à (1) est stationnaire si toutes les racines de l'équation $\Phi(z) = 0$ sont de module supérieur strictement à 1 (condition d'inversibilité de l'équation).

On trouvera à la figure B.9.4, page suivante, un tracé de quelques processus AR(1) ($\tilde{x}_n + \phi_1\tilde{x}_{n-1} = \tilde{\varepsilon}_n$) pour des valeurs différentes de ϕ_1. Rappelons que si $|\phi_1| < 1$, le processus est stationnaire.

Si $|\phi_1| = 1$, le processus n'est pas stationnaire mais ne diverge pas nécessairement. Par contre, dès que $|\phi_1| > 1$, alors le processus diverge de façon exponentielle.

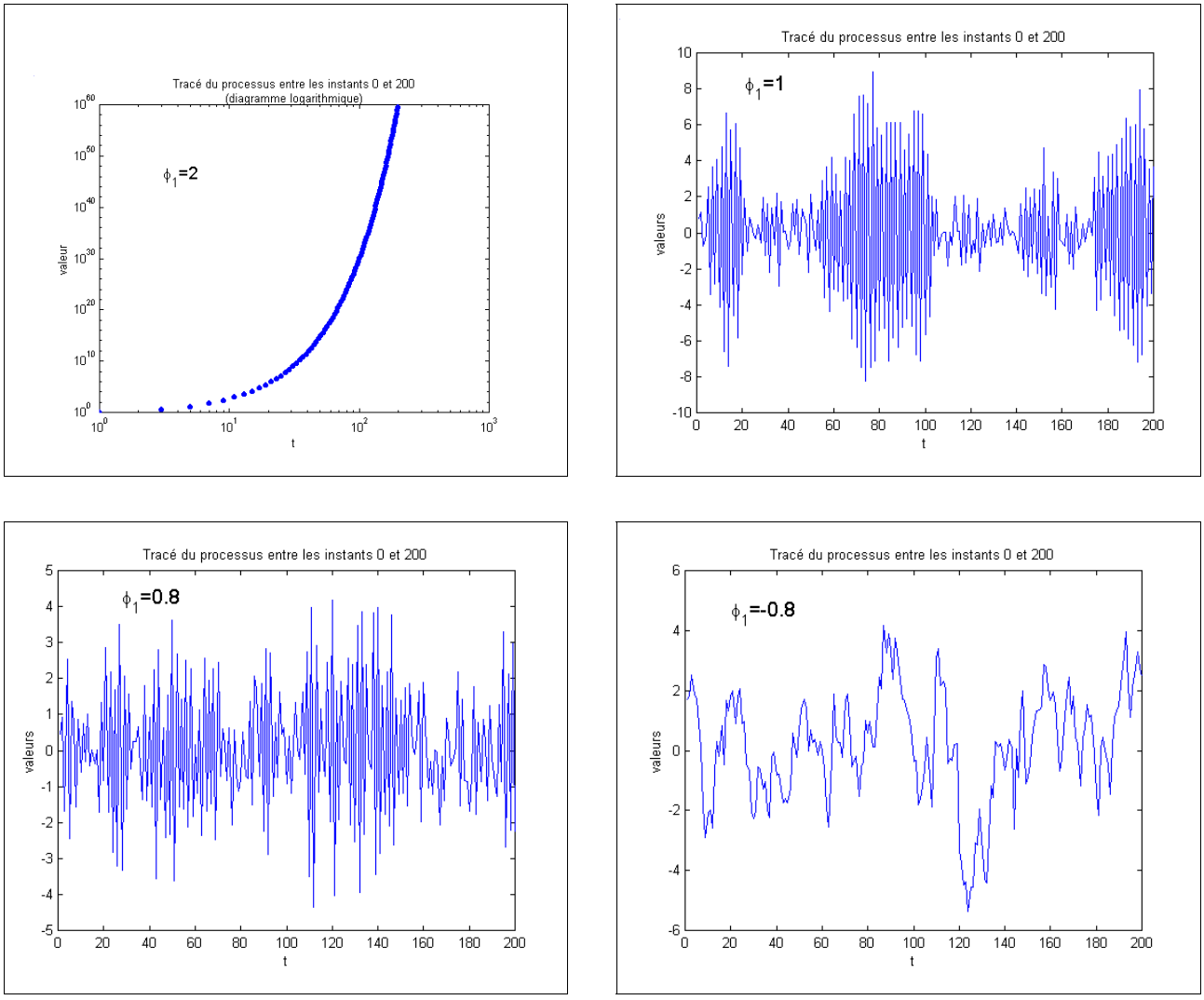


figure B.9.4 *: tracé d'un AR(1) pour quelques valeurs de* ϕ_1

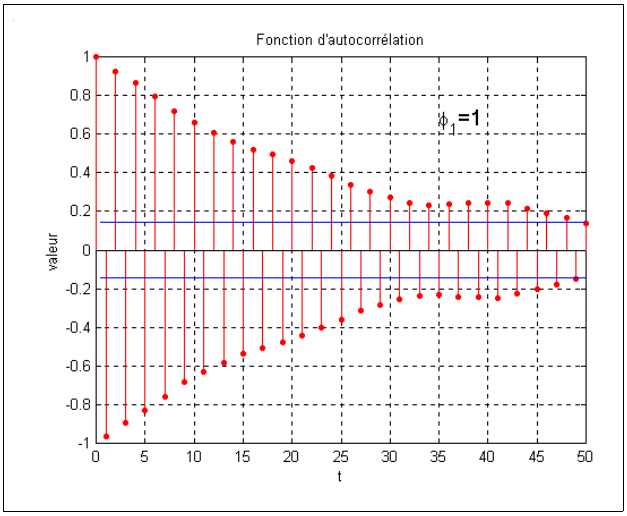
La figure B.9.5, page suivante, montre les tracés des fonctions d'autocorrélation correspondantes. La figure B.9.6 montre la densité spectrale et la figure B.9.7, la fonction d'autocorrélation partielle. Cette fonction joue un rôle très particulier dans l'identification et l'estimation des processus ARMA.

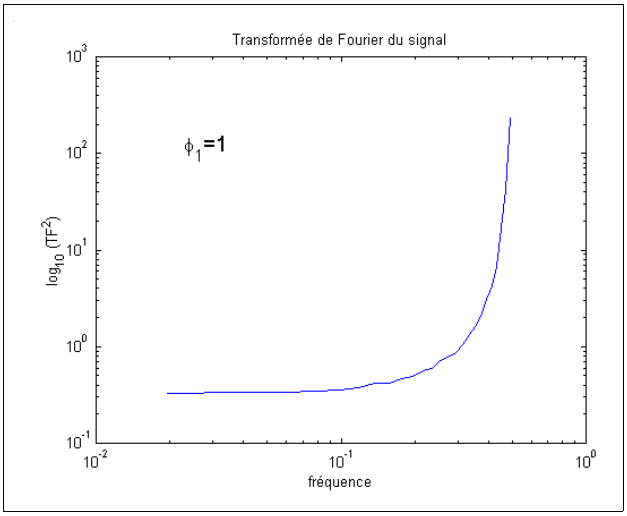
L'autocorrélation partielle correspond au coefficient de la régression linéaire multiple de $\tilde{x}_t$ sur $(\tilde{x}_{t+1},\ldots,\tilde{x}_{t+h})$, soit le coefficient α_h du problème d'estimation $\tilde{x}_t = \alpha_0 + \sum_{i=1}^{h} \alpha_i \tilde{x}_{t+i}$ à résoudre en $(\alpha_0, \alpha_1,\ldots, \alpha_h)$ par moindres carrés. On montre que lorsque le processus est stationnaire, cette fonction d'autocorrélation partielle est indépendante du temps. Par rapport à la fonction d'autocorrélation, la fonction d'autocorrélation partielle apporte une information sur le lien entre $\tilde{x}_t$ et $\tilde{x}_{t+h}$ dépourvu de l'influence des corrélations intermédiaires. Son utilisation conjointe à celle de la fonction d'autocorrélation permet de caractériser l'ordre du processus ARMA.

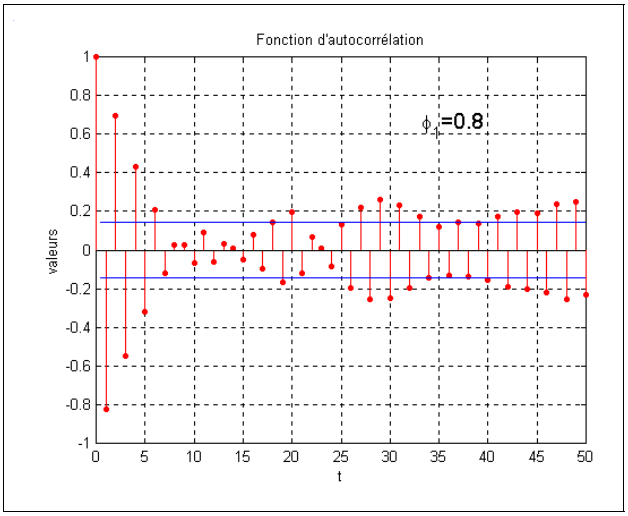
Quelques éléments clé pour analyser les résultats :

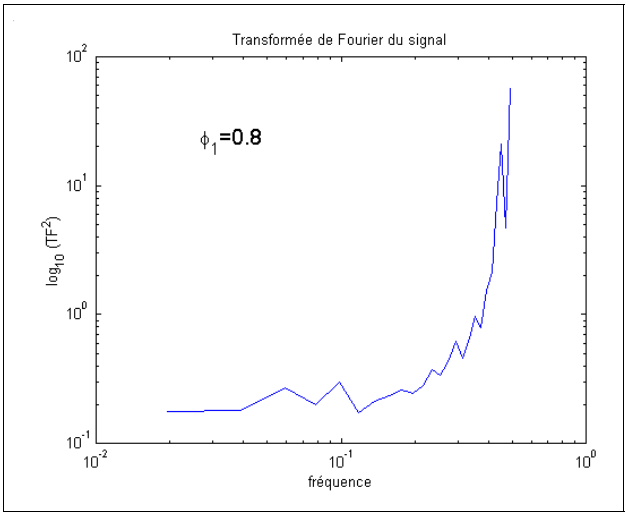
- un processus non stationnaire et non divergent possède une fonction d'autocorrélation qui diminue très lentement. Les valeurs de l'autocorrélation sont très proches d'un retard au suivant ;
- pour un processus stationnaire, l'autocorrélation ou l'autocorrélation partielle doivent s'annuler à partir d'un certain rang.
- L'autocorrélation et l'autocorrélation partielle jouent un rôle symétrique :
    - pour un processus AR(p), l'autocorrélation partielle s'annule à partir du rang p ; l'autocorrélation diminue sous une forme exponentielle ou sinusoïdale amortie ;
    - pour un processus MA(q), l'autocorrélation s'annule à partir du rang q ; l'autocorrélation partielle diminue sous une forme exponentielle ou sinusoïdale amortie ;

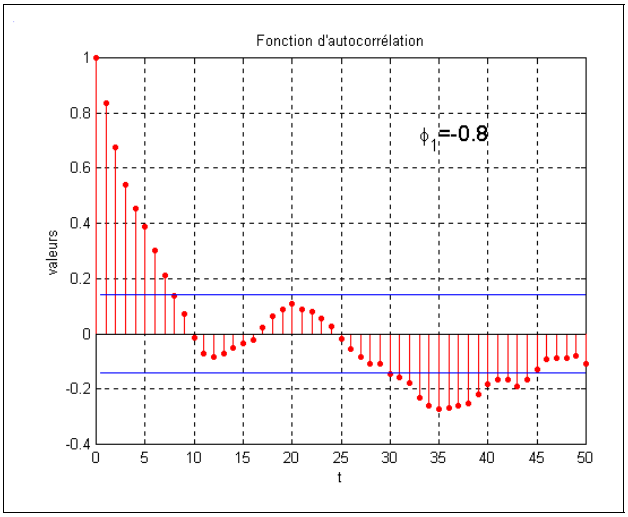
- pour un processus ARMA(p,q) les deux effets sont mélangés, donc nécessairement plus difficiles à caractériser. Des méthodes existent. Elles ont été utilisées pour ce travail et sont décrites dans les ouvrages cités en référence.











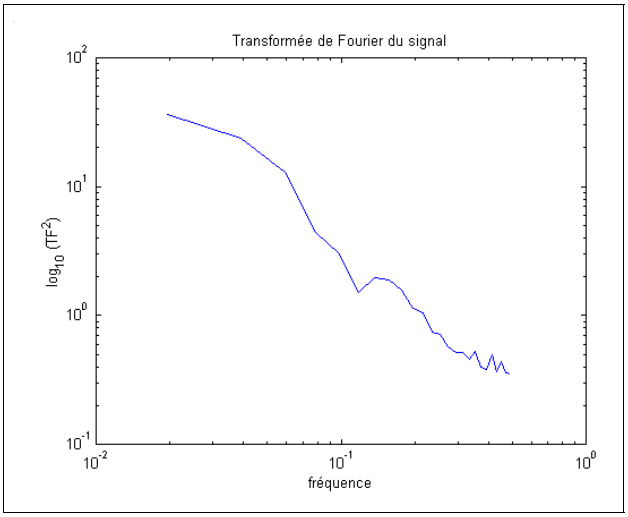
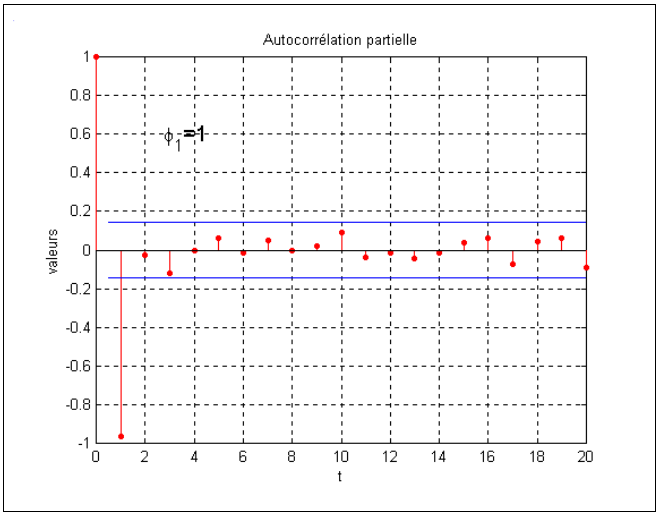


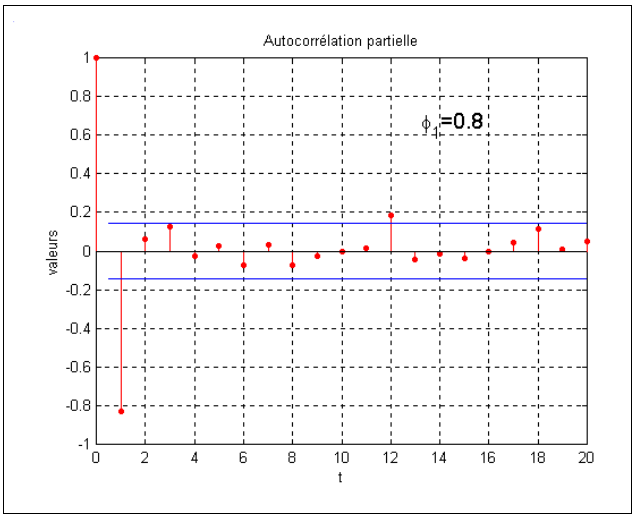
figure B.9.5

Tracé des fonctions d'autocorrélation correspondant aux processus donnés à la figure B.9.4.

figure B.9.6

Tracé des densités spectrales associées aux processus donnés à la figure B.9.4.





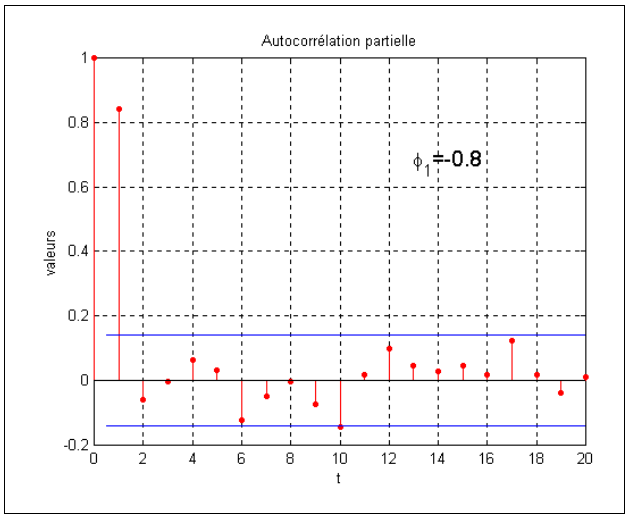


figure B.9.7

Tracé des autocorrélations partielles des processus donnés à la figure B.9.4.

On peut construire un processus convergent d'estimation des coefficients des polynômes Φ et Ψ, dans le cas stationnaire. Un ouvrage de référence dans ce domaine est le livre de [BOX et al 94].

Les éléments clés du processus sont :

1- l'identification de la stationnarité du processus ou la construction d'un processus stationnaire issu du processus initial ;

2- la détermination de l'ordre de l'ARMA ;

3- l'estimation des coefficients des polynômes Φ et Ψ dans le cas stationnaire ;

4- l'évaluation du signal résiduel présent dans les résidus de l'estimation. Ces résidus sont appelés innovations.

Les points 2, 3 et 4 donnent lieu à un schéma itératif. L'ensemble du traitement n'est pas décrit ici : le lecteur est invité à se reporter à [BOX et al 94], [BRESSON, PIROTTE 95] ou [GOURIEROUX, MONTFORT 83].

Un dernier point reste à mentionner sur le traitement des processus non stationnaires et non divergents. Ces processus coïncident, en termes de processus autorégressifs, avec la présence dans le polynôme Φ de racines unités (simples ou multiples).

Dans ce contexte, la méthode la plus naturelle pour dériver un processus stationnaire d'un processus non stationnaire consiste à différencier le processus original. Ainsi, si $(\tilde{x}(t))$ est un processus non stationnaire et non divergent, alors il existe un polynôme Λ dont toutes les racines sont de module 1 tel que $\Lambda(B)\tilde{x}(t)$ soit stationnaire.

Dans la pratique, on cherche $\Lambda(\mathrm{B})$ sous la forme $(1-\mathrm{B})^d$ ou $(1-\mathrm{B}^s)$ selon que le signal présente ou non une périodicité. On définit donc une nouvelle classe de processus, les processus ARIMA (pour Auto-Regresive Integrated Moving Average) dont l'analyse consiste à établir l'ordre de différenciation qui permet de se ramener à un processus ARMA, puis à analyser ce processus ARMA avec les techniques classiques, pour finalement inverser le problème.

Résultats de l'expérience

Vingt-quatre heures de données ont été analysées (jour 341 de l'année 2000) et les résultats sont présentés ci-dessous. Le détail du traitement de la composante verticale est d'abord proposé. Puis les résultats du traitement des deux autres composantes sont exposés succinctement. À noter que d'autres jours ont été traités et les résultats du processus ARMA estimé sont identiques.

Principe du traitement et exploitation des résultats

On note $\widetilde{X}(t)$ le signal observé. L'hypothèse de base du raisonnement suppose que : $\widetilde{X}(t) = f(t) + \widetilde{\upsilon}(t)$ où f est un signal déterministe (les mouvements de la station) et $\widetilde{\upsilon}$ un signal aléatoire de moyenne nulle. On supposera que : $\widetilde{\upsilon}$ est stationnaire. De ce fait, la cause de non stationnarité de $\widetilde{X}(t)$ en moyenne est la présence de f.

Supposons que l'on constate que le signal $(1-\mathrm{B})\widetilde{X}(t) = \widetilde{x}(t)$ est stationnaire. Dans ce cas, $(1-\mathrm{B})\widetilde{X}(t) \approx f'(t)\delta t + \widetilde{\upsilon}(t) - \widetilde{\upsilon}(t-\delta t)$ où δt est l'intervalle d'échantillonnage. $\widetilde{x}$ étant stationnaire, cela implique que $\left|f'(t)\delta t\right| \approx 0$. C'est vrai lorsque les variations de la position sont faibles entre deux instants de l'échantillonnage vis-à-vis du bruit de mesure.

Le signal $\widetilde{x}(t)$ est stationnaire. Donc il existe Φ et Ψ finis tels que :

$$(1+\Phi(\mathrm{B}))\widetilde{x}(t) = (1+\Psi(\mathrm{B}))\widetilde{\varepsilon}(t) \qquad (1)$$

et $\widetilde{\varepsilon}$ un bruit blanc. L'inversion du filtre (1) permet de trouver une relation entre $\widetilde{\varepsilon}$ et $\widetilde{\upsilon}$ de la forme : $\widetilde{\upsilon}(t) = (1+\Omega(\mathrm{B}))\widetilde{\varepsilon}(t)$. Par conséquent, on en déduit un estimateur sans biais de $f(t)$ d'expression

$$\hat{f}(t) = \widetilde{X}(t) - (1+\Omega(\mathrm{B}))\widetilde{\varepsilon}(t) \qquad (2)$$

D'un point de vue pratique, $\widetilde{\varepsilon}$ est obtenu de façon itérative. La relation (1) donne la densité conditionnelle de $\widetilde{x}(t)\left|\varepsilon(t-\delta t),...,\varepsilon(t-N\delta t);x(t-\delta t),...,x(t-K\delta t)\right.$ (le polynôme Ψ est de degré N et le polynôme Φ est de degré K), de sorte que l'on peut construire un estimateur de $\widetilde{x}(t)$ par :

$$\hat{x}(t)\left|\varepsilon(t-\delta t),...,\varepsilon(t-N\delta t);x(t-\delta t),...,x(t-K\delta t) = \Psi(\mathrm{B})\varepsilon(t) - \Phi(\mathrm{B})x(t)\right. \qquad (3)$$

car $\mathrm{E}(\widetilde{\varepsilon}(t)) = 0$. On en déduit que $\widetilde{\varepsilon}(t) = \widetilde{x}(t) - \hat{x}(t)$.

Analyse du signal en h

La dispersion du signal autour de 0 est de 5,29 (écart-type). La figure B.9.9 (page suivante) montre l'autocorrélation du signal.

Cette fonction montre très clairement que le signal n'est pas stationnaire (convergence très lente des retards vers 0). On en déduit qu'il faut blanchir la série afin de la rendre stationnaire. La première méthode envisagée est la méthode des différences premières.

En théorie, on annule ainsi les non-stationnarités correspondant à des variations aux basses fréquences (par rapport à l'échantillonnage) sans variation significative de la variance du signal. On procède à cette différenciation.

La fonction d'autocorrélation du signal différencié est donnée à la figure B.9.10.

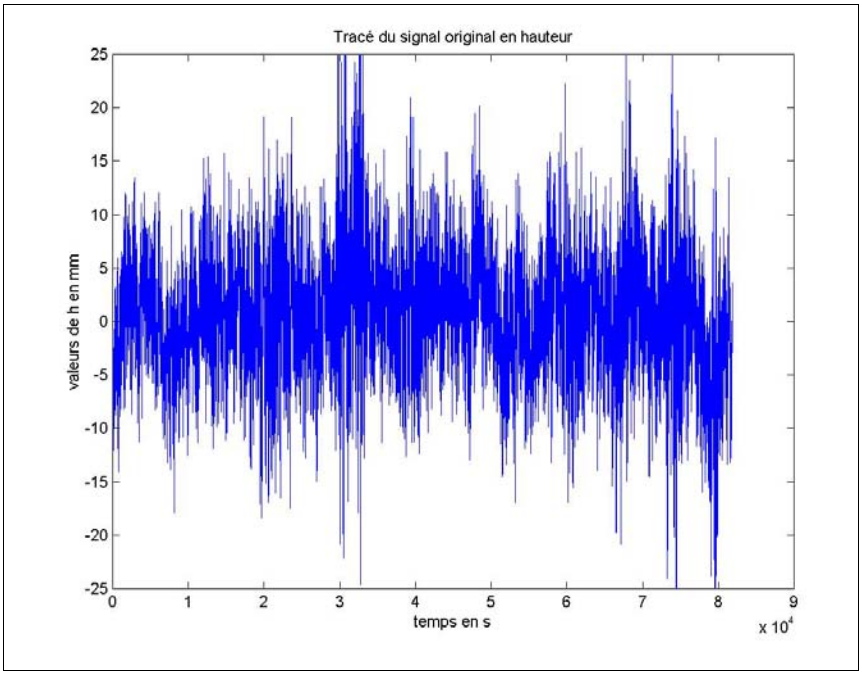


figure B.9.8

Tracé de la position verticale de la station.

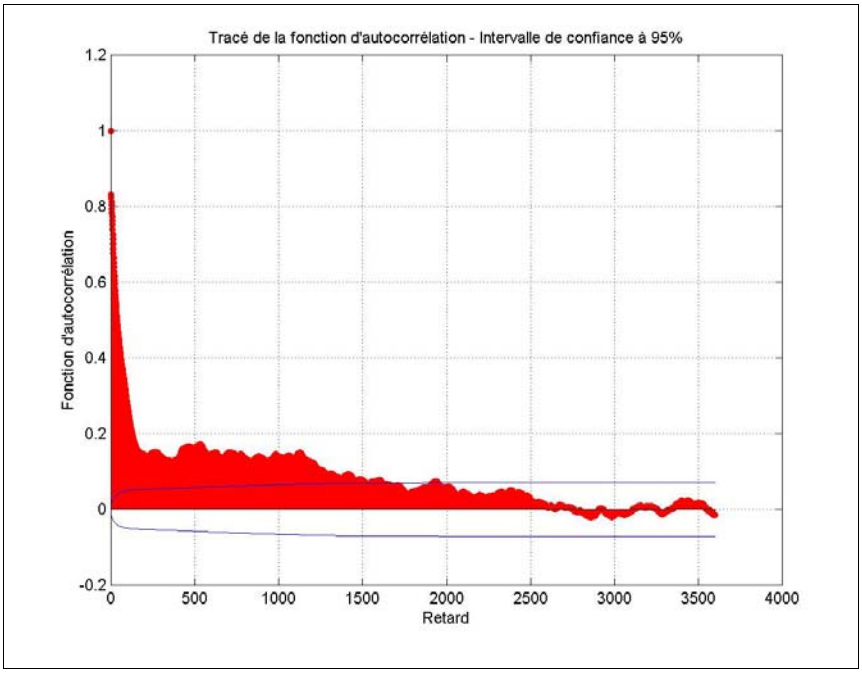
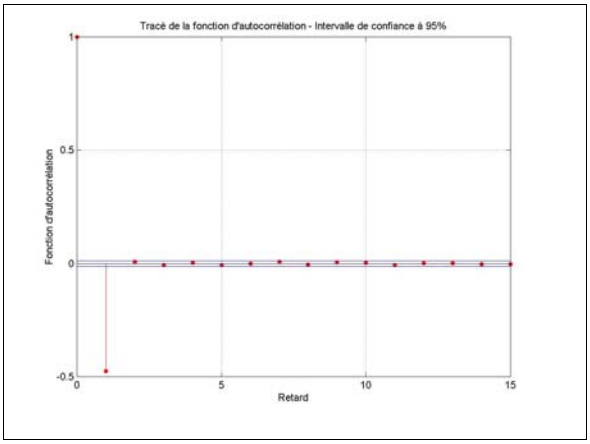


figure B.9.9

Tracé de la fonction d'auto-corrélation de la composante verticale. Cette figure montre l'auto-corrélation du signal.



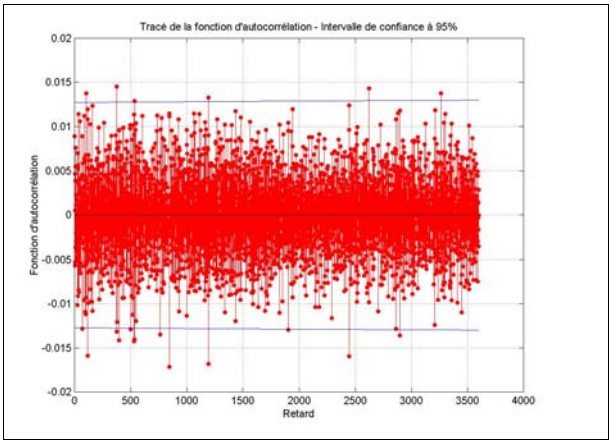


figure B.9.10

Détail de la fonction d'autocorrélation de la composante verticale blanchie (différences premières).

On constate que le premier retard est particulièrement significatif. Les retards suivants sont peu significatifs à quelques exceptions près que nous allons étudier maintenant. À première vue, le signal différencié semble stationnaire. Par ailleurs, le premier retard de la fonction d'autocorrélation est très significatif. On peut donc penser à modéliser le signal par un processus moyenne mobile d'ordre 1 (MA(1)).

La fonction d'autocorrélation partielle à décroissance exponentielle confirme ce diagnostic (figure B.9.11). En dehors de cette modélisation, il reste quelques termes significativement non nuls, aussi bien dans l'autocorrélation que dans l'autocorrélation partielle. Les résidus du traitement indiqueront la stratégie à suivre.

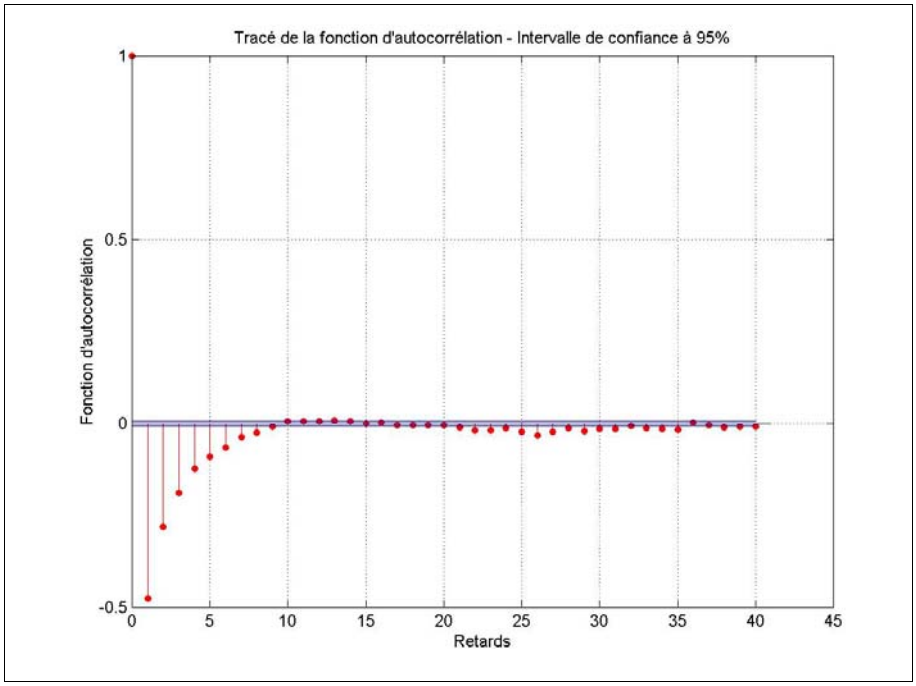


figure B.9.11

Fonction d'autocorrélation partielle de la hauteur.

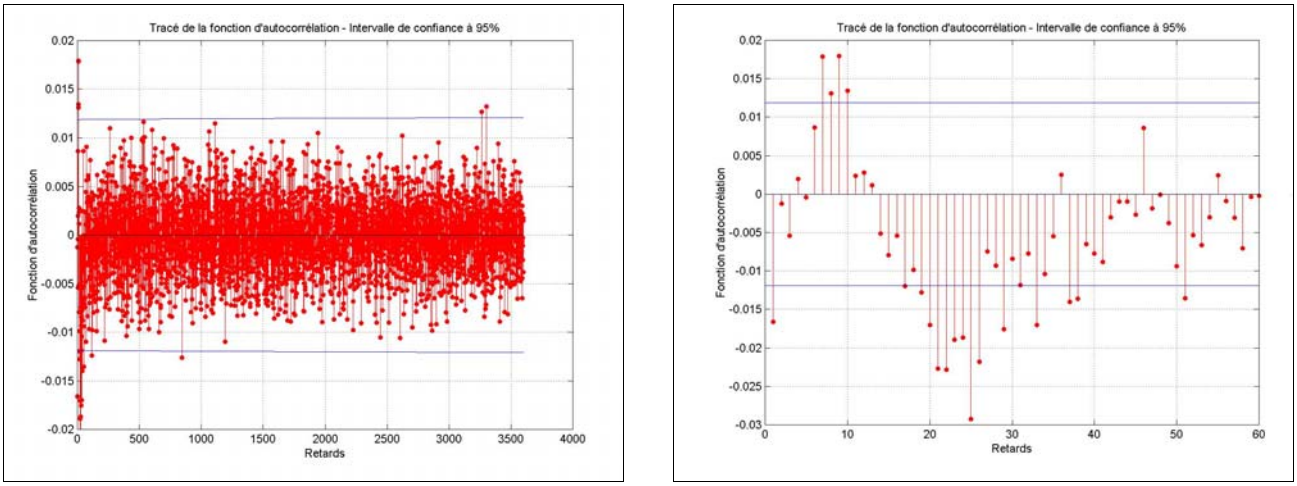


figure B.9.12

Fonction d'autocorrélation des innovations.

La figure B.9.12 donne la fonction d'autocorrélation sur une heure de données, ainsi que le détail sur une minute. La figure B.9.13 (page suivante) donne la fonction d'autocorrélation partielle des innovations du signal différencié. Ces deux figures confirment, qu'au premier ordre, le processus est caractérisé par une moyenne mobile d'ordre 1. Les innovations conservent des retards significativement non nuls.

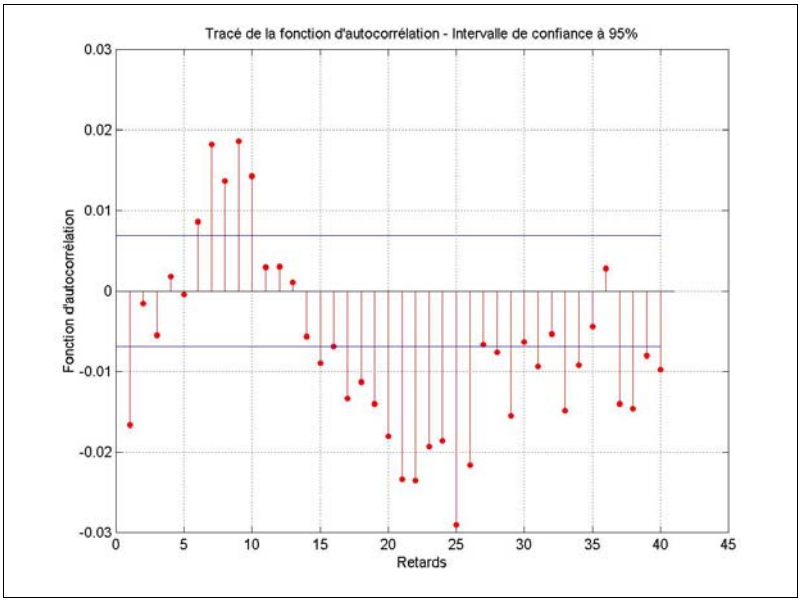


figure B.9.13

Fonction d'autocorrélation partielle des innovations du signal en hauteur différenciée.

Il convient donc, à première vue, de développer le modèle ARMA. Le modèle a été développé jusqu'à une quarantaine de termes dans le développement de l'auto-régressif. On aboutit finalement à une autocorrélation et une autocorrélation partielle correspondant à la figure B.9.14. Toutefois la variance des innovations ne décroît que très faiblement (quelques %), de sorte qu'il semble inutile de compléter le modèle.

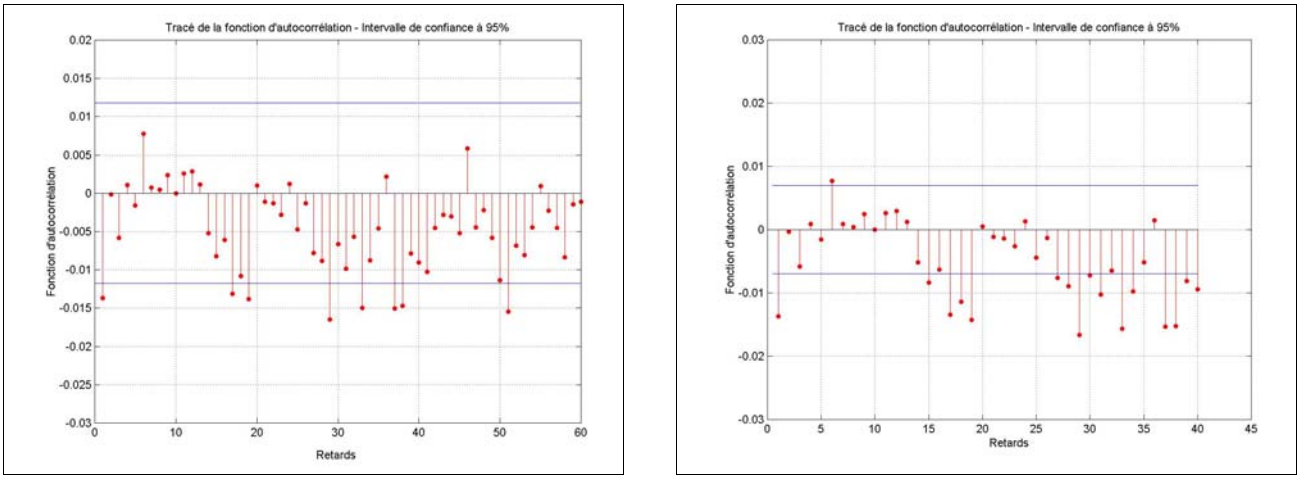


figure B.9.14

Autocorrélation et autocorrélation partielle après développement du modèle ARMA pour la hauteur.

La figure B.9.15, page suivante, montre le tracé du signal résiduel après inversion de l'ARMA du signal différencié et inversion des différences premières. L'écart-type du signal résiduel (la dispersion autour de 0) est de 2,51mm, à comparer aux 5,29 mm initiaux. La réduction du bruit est donc assez considérable.

L'analyse des signaux en latitude et longitude s'opère de la même manière. On montre aisément que le signal répond à la description en moyenne mobile d'ordre 1, pour 50 % de la variance. Le tracé de la latitude et des innovations en latitude est donné à la figure B.9.16. Le tracé de la longitude est donné à la figure B.9.17 (page suivante).

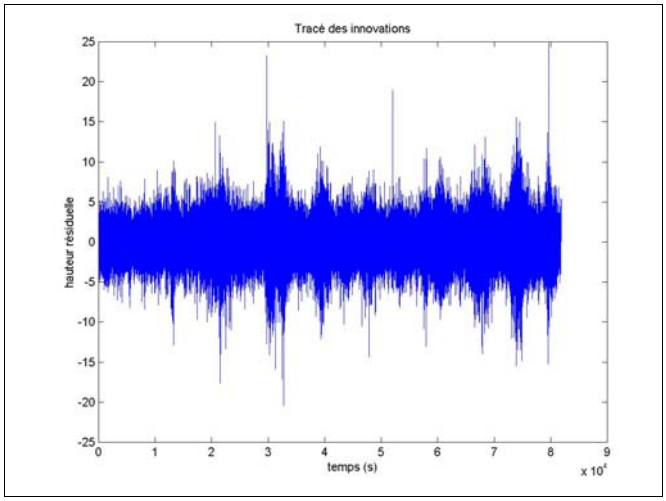


figure B.9.15

Innovations (signal résiduel identifié aux mouvements du mât dans notre analyse) du signal vertical.

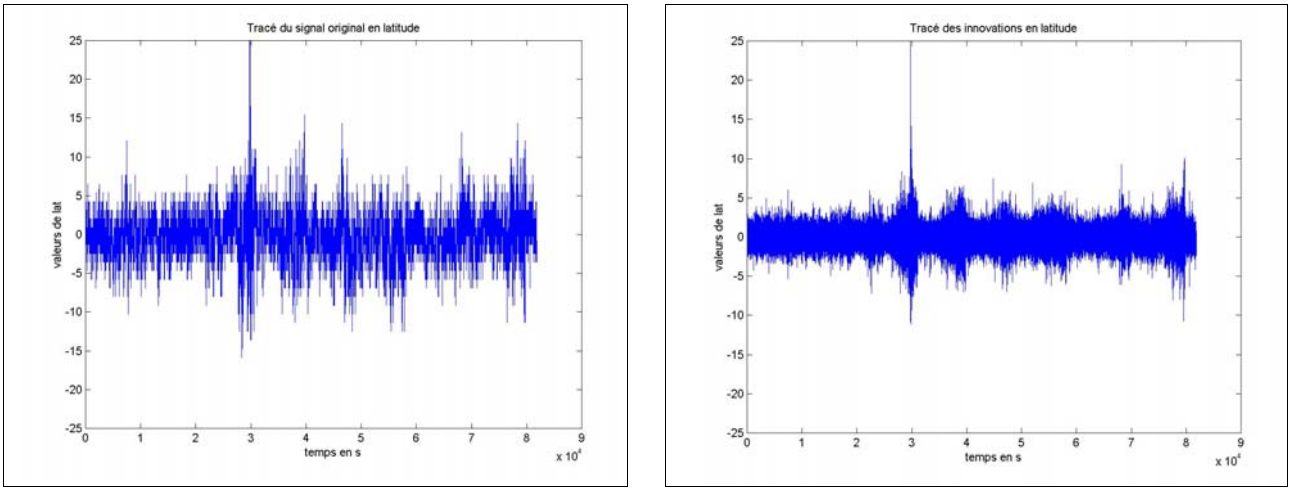


figure B.9.16

Tracé du signal bruité et débruité en latitude.

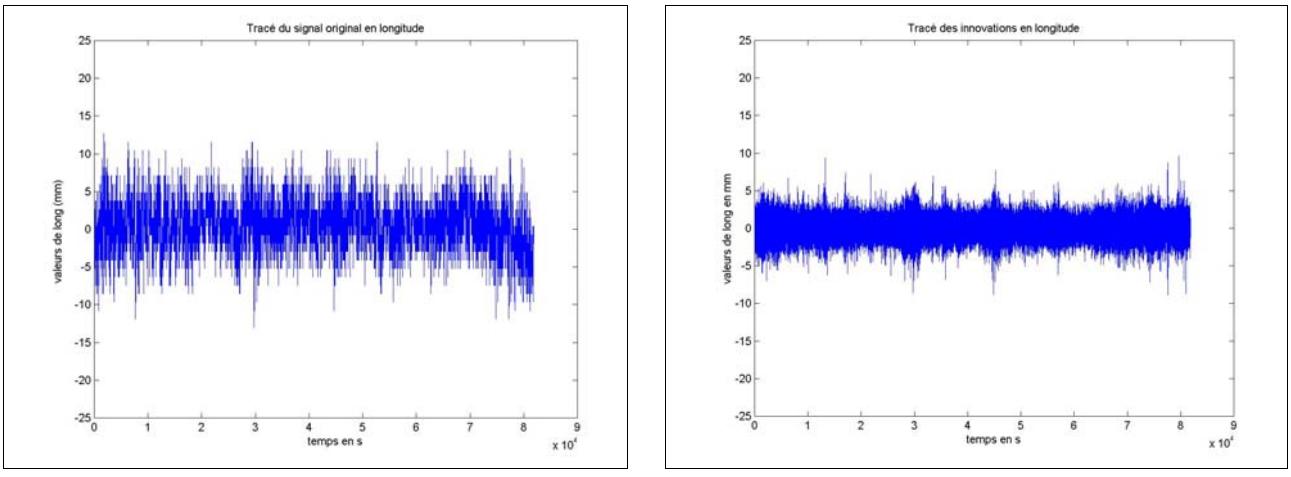


figure B.9.17

Tracé du signal bruité et débruité en longitude.

La table B.9.2 montre les modèles stochastiques ajustés par composantes du signal.

***table B.9.2** : modèles stochastiques estimés par composante*

Composante	Modèle
Hauteur	$(1-\mathrm{B})\widetilde{x}(t) = (1-0.688\,\mathrm{B})\widetilde{\varepsilon}(t)$ $\pm\ 2.5\times10^{-3}$
Nord	$(1-\mathrm{B})\widetilde{x}(t) = (1-0.705\,\mathrm{B})\widetilde{\varepsilon}(t)$ $\pm\ 2.5\times10^{-3}$
Est	$(1-\mathrm{B})\widetilde{x}(t) = (1-0.700\,\mathrm{B})\widetilde{\varepsilon}(t)$ $\pm\ 2.5\times10^{-3}$

On constate à la table B.9.2, la remarquable stabilité de l'estimation selon la composante à laquelle on s'intéresse. Ceci est probablement le signe d'une réelle dépendance d'un instant sur l'autre de la détermination GPS. Cette dépendance est peut-être un artefact de l'analyse des observations GPS engendré par le logiciel GEOGENIUS.

La table B.9.3 montre les variances *a priori* et *a posteriori* du signal.

***table B.9.3** : écart-type a priori et a posteriori des signaux*

	Ecart-type *a priori* (en mm)	Ecart-type *a posteriori* (en mm)
Composante verticale	5,29	2,51
Nord	2,90	1,40
Est	2,92	1,39

Conclusion

L'objectif initial du projet était de traiter des signaux GPS obtenus à échantillonnage très élevé afin d'étudier la stabilité d'une monumentation. Le bruit de mesure GPS étant très élevé (5 mm en vertical, 2,5 mm en horizontal), il s'est avéré nécessaire d'étudier des méthodes de réduction de bruit de mesure. La méthode proposée ici consiste à appliquer les techniques de traitement de série temporelle par processus auto-régressifs et moyennes mobiles.

Par ces méthodes, le bruit de mesure a été divisé par deux, ce qui rend possible l'étude de stabilité. La méthode est intéressante, d'autant que le nombre de paramètres estimés est très faible (un seul paramètre pour caractériser la dépendance d'un instant sur l'autre du signal). Ces travaux méritent d'être complétés, en ajoutant à l'étude GPS, l'observation du monument par d'autres systèmes de mesure (théodolite motorisé). Par ailleurs, cette étude ouvre des perspectives intéressantes. Son application dans le contexte de réseaux géodésiques étendus pourrait permettre de réduire très significativement certaines formes de bruits caractéristiques des réseaux modernes.

En particulier, il est certainement possible d'analyser par des méthodes comparables le « bruit » de mise en référence d'un réseau de stations géodésiques d'un instant à l'autre (de type RGP, par exemple). En effet, ce bruit est un mode commun à l'ensemble des stations et devrait apparaître dans l'autocorrélation de l'ensemble du réseau. À terme, l'objectif de cette recherche est de faire le lien avec les travaux effectués au laboratoire LAREG sur la signature du mode de définition d'un référentiel géodésique dans la covariance des paramètres estimés [SILLARD, BOUCHER 00].

Dans un autre ordre d'idées, d'autres travaux en cours au laboratoire LAREG touchent aux séries temporelles de jeux de coordonnées. L'évolution de la Géodésie vers des mesures continues exige d'envisager une évolution de la représentation des réalisations de référentiels géodésiques. Le système international de référence terrestre (ITRS) est réalisé par un jeu de position et de vitesses constantes de stations [BOUCHER 99].

Les séries temporelles de positions, *a priori* plus riches que la description précédente, se heurtent à la difficulté de mise en référence d'un instant à l'autre. Comment assurer qu'en moyenne la référence est stable de sorte que les positions successives sont effectivement exprimées dans un unique référentiel ? La question est difficile et constitue probablement l'un des challenges de la géodésie pour la prochaine décennie. La résolution de cette difficulté passe par la compréhension et la modélisation des bruits présents dans les séries temporelles géodésiques.

Références

[AGNEW 92] D.C. Agnew : *The time-domain behavior of power-law noises,* Jour. of Geophys, in Res. vol. 19, n° 4, pp. 333-336, 1992.

[BOX et al 94] G.E.P. Box, G.M. Jenkins and G.C. Reinsel : *Time Series Analysis,* 3rd edition, Prentice Hall, 1994.

[BRESSON, PIROTTE 95] G. Bresson & A. Pirotte : *Econométrie des séries temporelles,* Presses universitaires de France, 1995.

[GOURIEROUX, MONTFORT 95] C. Gourieroux & A. Montfort : *Cours de séries temporelles et modèles dynamiques,* 2ème édition, in Economica, 1995.

[LANGBEIN, JOHNSON 97] J. Langbein and H. Johnson : *Correlated errors in geodetic time series : Implications for time-dependent deformation,* in Jour. of Geophys. Res. vol. 102, n° B1, pp. 591-603, 1997.

[LANGBEIN 99] A. Mao, C.G.A. Harrison and T.H. Dixon : *Noise in GPS coordinates time series,* in Jour. of Geophys. Res. vol. 104, n° B2, pp. 2797-2816, 1999.

[PAPOULIS 91] A. Papoulis : *Probability, random variables and stochastic processes,* Mc Graw-Hill, 1991.

[RUTMAN 78] J. Rutman *: Characterisation of phase and frequency instabilities in precision frequency sources : fifteen years of progress,* in Proc. of the IEEE, vol. 66 n° 9, pp. 1048-1075, 1978.

[WYATT 89] F.K.Wyatt : *Displacement of surface monuments,* Jour. of Geophys. Res. vol. 94, n° B2, pp. 1655-1664, 1989

[ZHANG et al 97] L. Zhang, Y. Bock, H. Johnson, P. Fang, S. Williams, J. Genrich, S. Wdowinski and J. Behr : *Southern California Permanent GPS Geodetic Array : Error analysis of daily position estimates and site velocities,* in Jour. of Geophys. Res. vol. 102, n° B8, pp. 18035-18055, 1997.

Publications

[BOUCHER et al 99] C. Boucher, Z. Altamimi and P. Sillard *: The 1997 International Terrestrial Reference Frame ITRF97*, in IERS technical note 27, IGN-ENSG-LAREG, 1999.

[SILLARD, ALTAMIMI 01] P. Sillard and Z. Altamimi : *Terrestrial Frame and Earth Orientation Parameters combination from multi-technique Space Geodesy data,* submitted to Journal of Geodesy, IGN-ENSG-LAREG, 2001.

[SILLARD, BOUCHER 00] P. Sillard and C. Boucher : *Algebraic minimum constraints for reference frame datum definition*, in Journal of Geodesy, in press, IGN-ENSG-LAREG, 2000.

C. Publications

Isabelle Melot

La liste suivante présente les références des publications issues du programme de recherche 2000. Elle reprend les références données dans les différents articles du Bulletin. On peut se procurer les publications en libre diffusion auprès du Service de la recherche :

Service de la recherche
Institut géographique national

2-4 avenue Pasteur
F-94165 SAINT MANDÉ CEDEX

téléphone : (33) 01 43 98 83 19
télécopie : (33) 01 43 98 81 71

adresse électronique : isabelle.melot@ign.fr

Thèses de doctorat

[BADARD 00] Thierry Badard : *Propagation des mises à jour dans les bases de données géographiques multi-représentations par analyse des changements géographiques*, thèse de doctorat de l'Université de Marne-la-Vallée, spécialité : Sciences de l'Information Géographique, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-026/C-THE-TB, soutenue le 15 décembre 2000.

[BOICHIS 00] Nicolas Boichis : *Extraction automatique des carrefours routiers dans les images aériennes guidée par une base de données cartographique*, thèse de doctorat de l'Université de Cergy-Pontoise, spécialité : Traitement de l'Image et du Signal, laboratoire MATIS, IGN-SR 00-004/S-THE-NB, soutenue le 3 mars 2000.

[DE LA LOSA 00] Arnaud de la Losa : *Modélisation de la troisième dimension dans les bases de données géographiques*, thèse de doctorat de l'Université de Marne-la-Vallée, spécialité : Sciences de l'Information Géographique, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-005/C-THE-ADLL, soutenue le 28 janvier 2000.

[MOREL 00] Laurent Morel : *Références géodésiques pour les futures missions altimétriques : application à la mission Jason,* thèse de doctorat de l'Observatoire de Paris, IGN, ENSG, laboratoire LAREG, soutenue le 3 octobre 2000.

Articles à journal scientifique

[BADARD, LEMARIÉ 00] Th. Badard & C. Lemarié : *Propagating updates between geographic databases,* in International Journal of Geographical Informattion Science (IJGIS), Ed. Taylor and Francis, London, 12 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-032/S-ART-TB, 2000.

[BADARD, RICHARD 00] Th. Badard & D. Richard : *Livraisons des évolutions pour les BDG. Une proposition autour du XML,* in Revue de Géomatique, Éditions Hermès, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-034/S-ART-TB, 2000.

[BADARD, RICHARD 00] Th. Badard & D. Richard : *Using XML for the exhange of updating information between geographical information systems,* in CEUX Journal Elsevier, 12 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-033/S-ART-TB, 2000.

[BADARD, SPÉRY 00] T. Badard & X. Spéry : *Problèmes liés à l'échange et à l'intégration des mises à jour dans les BDG,* in IGAT, Éditions Hermès, 21 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-035/S-ART-TB, 2000.

[BEAUDUCEL et al 00] F. Beauducel, F.-H. Cornet, E. Suhanto, T. Duquesnoy, M. Kasser : *Constraints on magma flux from displacement data at Merapi volcano,* Java (Indonesia), in Journ. Geophys. Res., vol. 105, B4, pp. 8193-8203, IGN/LAREG, 2000.

[BOCK et al 00] O. Bock, J. Tarniewicz, C. Thom, J. Pelon & M. Kasser : *Study of external path delay correction techniques for high accuracy height determination with GPS,* in Phys. Chem. Earth, MS n° G4.3-0013, August 2000, laboratoire OEMI, IGN-SR 00-006/L-ART-OB, 2000.

[BOCK 00] O. Bock : *Results of the first aircraft experiment with the wide-angle airborne laser ranging system,* in European Physical Journal, Applied Physics, vol. 10, n° 1, pp. 79-86, April 2000, laboratoire OEMI, IGN-SR 00-004/L-ART-OB, 2000.

[BOUIN, VIGNY 00] M-N. Bouin & C. Vigny : *New constraints on Antarctic plate motion and deformation from GPS data,* in Journal of Geophysical Research, 105 (B12), pp. 8 279-28293, IGN/LAREG, 2000.

[CALAIS et al 00] E. Calais, R. Bayer, J. Chéry, F. Cotton, E. Doerflinger, M. Flouzat, F. Jouanne, M. Kasser, M. Laplanche, D. Maillard, J. Martinod, F. Mathieu, P. Nicolon, J.-M. Nocquet, O. Scotti, L. Serrurier, M. Tardy, C. Vigny & Regal : *Réseau GPS permanent dans les Alpes occidentales. Configuration et premiers résultats / REGAL; a permanent GPS network in the Western Alps. Configuration and first results,* in C.R. Acad. Sci. Ser. II, 331, 435-442, IGN/LAREG, 2000a.

[DUCHÊNE, RUAS 00] C. Duchêne & A. Ruas : *Généralisation de données géographiques : présentation des résultats du projet AGENT,* in Bulletin d'information de l'IGN, n° 72 : Bilan de la Recherche 2000 (2001/3), pp. 103-114, laboratoire COGIT, IGN-SR 01-026/S-ART-CD, 2000.

[DUCHÊNE, RUAS 00] C. Duchêne & A. Ruas : *Généralisation de données géographiques : présentation des résultatsdu projet AGENT,* in Bulletin d'Information de l'IGN n° 72 (2001/3), pages 103-115, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-012/S-ART, 2000.

[DUCHÊNE, SCIARDIS 00] C. Duchêne & Y. Sciardis : *Conception of typical geographical objects to evaluate automatic generalisation process*., in GIS Sciences, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-021/S-ART-CD, 2000.

[FUCHS 00] F. Fuchs & H. Le Men : *Efficient Subgraph Isomorphism with « a priori » knowledge. Application to reconstruction of buildings for cartography*, IAPR Workshop on Syntactic and Structural Pattern Recognition, SSPR'2000, in Lecture Notes in Computer Science, n° 1876, laboratoire MATIS, IGN-SR 00-016/C-COM-FF, 2000.

[GLEYZE 00] Jean-François Gleyze : *Apport de l'information géographique dans l'analyse des risques. Application à l'étude des perturbations du réseau routier à la suite de catastrophes*, in Bulletin d'Information de l'IGN n° 72 (2001/3), pages 69-84, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-004/S-ART, 2000.

[GUIGUES, VIGLINO 00] L. Guigues & J.-M. Viglino : *Géoréférencement automatique de feuilles cadastrales,* in Bulletin d'Information de l'IGN n° 72 (2001/3), pages 33-48, laboratoire MATIS, IGN-SR 00-026/S-ART, 2000.

[HUBERT 00] F. Hubert : *Conception d'une interface Web pour l'aide à la saisie des besoins en information géographique,* in Bulletin d'Information de l'IGN n° 72 (2001/3), pages 93-102, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-011/S-ART, 2000.

[KADRI-DAHMANI 00] H. Kadri-Dahmani : *Vers une approche de modélisation des bases de données géographiques pour une intégration cohérente des mises à jour*, in Bulletin d'Information de l'IGN n° 72 (2001/3), pages 85-92, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-006/S-ART, 2000.

[KASSER 00] M. Kasser : *FIG : Les méditerranéens se réunissent à Malte,* in Géomètre n° 10, octobre 2000, p. 17, IGN/LAREG, 2000.

[KASSER 00] M. Kasser : *FIG : Motion culturelle approuvée,* in Géomètre n° 7, juillet 2000, p. 22, IGN/LAREG, 2000.

[KASSER 00] M. Kasser : *Forum GPS : un besoin considérable d'informations,* in Géomètre n° 11, novembre 2000, p. 17, IGN/LAREG, 2000.

[KASSER 00] M. Kasser : *La FIG face à l'harmonisation des compétences et des langues,* in Géomètre n° 12, décembre 2000, p. 22, IGN/LAREG, 2000.

[KASSER 00] M. Kasser : *Les instruments de l'arpentage dans 2000 ans d'arpentage,* Edit. Publi-Topex, pp. 60-65, IGN/LAREG, 2000

[KASSER 00] M. Kasser : *Les stations GPS permanentes, une économie collective,* in Géomètre n° 3, mars 2000, pp. 34-38, IGN/LAREG, 2000.

[KASSER 00] M. Kasser : *Navsat 2000 affiche la montée en puissance de Galilo,* in Géomètre n° 7, juillet 2000, p. 15, IGN/LAREG, 2000.

[KASSER 00] M. Kasser : *Nivellement et GPS : l'entretien de la référence nationale altimétrique,* in Bulletin de l'INCT, 2000, n° 6, pp. 16-21 IGN/LAREG, 2000.

[KASSER 00] M. Kasser, Y. Egels : *Geometric surveying of landlide movements, in Landslides in the Thick Loess Terrain of North East China,* John Wiley & sons, Edit. Ed. Derbyshire, 286 p, pp. 263-277, IGN/LAREG, 2000.

[KASSER 00] M. Kasser, Y. Egels : *Slope instability : survey monitoring, in " Landslides in the Thick Loess Terrain of North East China "*, John Wiley & sons, Edit. Ed. Derbyshire, 286 p, pp. 219-224, IGN/LAREG, 2000.

[LECORDIX, MUSTIÈRE 00] F. Lecordix & S. Mustière : *De nouveaux outils de généralisation numérique*, in Bulletin du Comité Français de Cartographie, n° 163, pp. 40-44, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-047/S-ART-FL, 2000.

[MAAS et al 00] HG. Maas, Ch. Thom, J.-Ph. Souchon and C.K. Toth : *Digital Camera Experts Present their Views, "Three-Line Linear" versus "Multi-Head Array",* in revue GIM International, pp. 68-71, laboratoire OEMI, IGN-SR 00-002/L-ART-HGM, mai 2000.

[MARCHADIER 00] J. Marchadier : *Appariement de clichés terrestres guidé par un modèle : application à la construction de mosaïque de linéaire de rue*, in Bulletin d'Information de l'IGN n° 72 (2001/3), pages 25-32, laboratoire MATIS, IGN-SR 00-022/C-ART, 2000.

[MARCHADIER et al 00] J. Marchadier, S. Michelin and Y. Egels : *A Graph labelling Approach for connected Feature Selection*, SSPR'2000, in Lecture Notes in Computer Science, n° 1876, laboratoire MATIS, IGN-SR 00-015/C-ART-JM, 2000.

[MUNIER, KASSER 00] P. Munier & M. Kasser : *L'image satellite et la prise de vue aérienne : chacune ses atouts,* in Géomètre n° 10, octobre 2000, p. 34-35, IGN/LAREG, 2000.

[NICOLAS et al 00] J. Nicolas, F. Pierron, M. Kasser, P. Exertier, P. Bonnefond, F. Barlier and J. Haase : *French Transportable Laser Ranging Station : scientific objectives, technical features, and performance,* in Applied Optics, vol. 39, n° 3, pp. 402-410, IGN/LAREG, 2000.

[SILLARD et al 00] P. Sillard, S. Botton & D. Bouteloup : *Un exemple de traitement de séries temporelles de positionsd'instrument géodésique,* in Bulletin d'Information de l'IGN n° 72 (2001/3), pages 116-130, IGN-SR 00-001/G-ART, IGN/LAREG, 2000.

[SILLARD, BOUCHER 00] P. Sillard and C. Boucher : *Algebraic minimum constraints for reference frame datum definition*, in Journal of Geodesy, IGN/LAREG, 2000.

[TARNIEWICZ 00] J. Tarniewicz : *Amélioration de la précision de la composante altimétrique du GPS par une correction du délai troposphérique utilisant une mesure externe du contenu en vapeur d'eau,* in Bulletin d'Information de l'IGN n° 72 (2001/3), pages 59-68, laboratoire OEMI, IGN-SR 00-010/L-ART, 2000.

[THOM, SOUCHON 00] C. Thom & J.-Ph. Souchon : *Réalisation et mise en œuvre d'une caméra numérique multi-canaux,* in Bulletin d'Information de l'IGN n° 72 (2001/3), pages 49-58, laboratoire OEMI, IGN-SR 00-007/L-ART, 2000.

Communications en congrès

[ALTAMIMI 00] Z. Altamimi : *ITRF Status and plans for ITRF 2000,* in Proceedings of the International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2000 General Meeting, Febr. 21-24, Kötzing (D), NASA/CP-2000-209893, pp. 57-61, IGN/LAREG, 2000.

[ALTAMIMI 00] Z. Altamimi : *Relationship between ITRS, ETRS 89 and WGS 84,* in Proceedings of the FIG Seminar "The Mediterranean Surveyor in the new millenium", Malta, 18-21 Sept. 2000, 6 pages IGN/LAREG, 2000.

[ALTAMIMI, BOUCHER 00] Z. Altamimi and C. Boucher : *GLONASS and the International Terrestrial Reference System,* in Proceedings of the IGEX-98 Workshop, Sept. 13-14, 1999, Nashville, Tennessee (USA), Ed. by J.A. Slater, C. E. Noll, K. T. Gowey, IGS Central Bureau, JPL, Pasadena, California (USA), pp. 37-48, IGN/LAREG, 2000.

[BEL HADJ ALI, VAUGLIN 00] A. Bel Hadj Ali & F. Vauglin : *Assessing positional and shape accuracy of polygons in GISs,* 4th International Spatial Accuracy Assessement in Natural Ressources and Environmental Sciences, Amsterdam (NL), juillet 2000, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-036/S-COM-ABHA, 2000.

[BERTOLOTTO-LEIDINGER, HANGOUËT 00] Bertolotto-Leidinger & J.-F.Hangouët : *Inscription d'une frontière*, Colloque Cartographie, Géographie et Sciences Sociales, Tours (F), septembre 2000, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-037/S-COM-BL, 2000.

[BOCK, DOERFLINGER 00] O. Bock & E. Doerflinger : *Atmospheric processing methods for high accuracy positioning with the Global Positioning System,* COST-716 Workshop, Soria Moria, Oslo (N), July 10-12, laboratoire OEMI, laboratoire OEMI, IGN-SR 00-003/L-COM-OB, 2000.

[BOFFET 00] A. Boffet : *Creating urban information for cartographic generalisation,* International Symposium on Spatial Data Handling, SDH'2000, Pékin (Chine), 10-12 août 2000, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-046/S-COM-AB, 2000.

[BOFFET, COQUEREL 00] A. Boffet & C. Coquerel : *Urban Classification for Generalization Orchestration,* 19th Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS'2000, Amsterdam (NL), 16-23 juillet 2000, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-024/S-COM-AB, 2000.

[BOICHIS et al 00] N. Boichis & J.-M. Viglino : *Knowledge based system for the automatic extraction of road intersection from aerial images,* in International Archives of Photogrammetry an Remote Sensing XXXIII ISPRS, Amsterdam (NL), laboratoire MATIS, IGN-SR 00-010/C-COM-NB, juillet 2000.

[BONIN 00] O. Bonin : *New Advances in Error Simulation in Vector Geographical Databases,* Accuracy'2000, 12-14 juillet 2000, Amsterdam (NL), laboratoire COGIT, IGN-SR 00-028/S-COM-OB, 2000.

[BOUIN 00] M-N. Bouin : *New Plate Motion and Glacial Rebound Evidences in Antarctica derived from GPS data analysis, Gravity,* IAG International Symposium on Geoid and Geodynamics 2000, Banff, Canada, 31 juillet au 4 août 2000, IGN/LAREG, 2000.

[BUCHER 00] B. Bucher *: Geographic tasks and roles for users' access to geographic Information,* GISRUK'2000, York (UK), laboratoire COGIT, IGN-SR 00-055/S-COM-BB, 2000.

[BUCHER 00] B. Bucher : *L'accès des utilisateurs à l'information géographique : analyse du problème et proposition,* présenté aux journées Cassini, La Rochelle (F), laboratoire COGIT, IGN-SR 00-007/S-COM-BB, septembre 2000.

[BUCHER 00] B. Bucher *: Users' access to geographic information resources : a model of tasks and roles to specity intentional uses regarding available resources, asbtract*, in Proceedings of the EuroConference on Ontology and Epistemology for Spatial Data Standards, La Londe-les-Maures (F), laboratoire COGIT, IGN-SR 00-054/S-COM-BB, 2000.

[CALAIS et al 00] E. Calais, J.-M. Nocquet and A. Aufranc : *GPS network in the Upper Rhine Graben, EUCOR-URGENT project,* First Annual Scientific Workshop, 10-13 juillet 2000, Freibourg i. Br., IGN/LAREG, 2000.

[DE JOINVILLE et al 00] O. de Joinville, H. Maître, D. Piquet-Pellorce & M. Roux : *How to Design DEM Assessment Maps*, PRRS'2000, n° 1 901725 12 X, Andorra, laboratoire MATIS, IGN-SR 00-009/C-COM-ODJ, 1er septembre 2000.

[DEHANT et al 00] V. Dehant, M. Feissel, O. De Viron, M.-Yseboodt and C. Bizouard *: Analysis of the residuals between theoretical nutations and VLBI observations (poster)*, Ass. Géné. De l'Union Astronomique Internationale, août 2000, IGN/LAREG, 2000.

[FEISSEL 00] M. Feissel : *Détermination des mutations de la Terre et stabilité du référentiel extragalactique,* 2ème Colloque AGRET, 8-10 novembre 2000, Grasse (F), IGN/LAREG, 2000.

[FEISSEL 00] M. Feissel : *DOMES numbers and IERS source designations as normalized names in IVS operation,* 2000 meeting of the International VLBI Service for geodesy and astrometry (IVS), Kötzting (D), 21-25 février 2000, IGN/LAREG, 2000.

[FEISSEL 00] M. Feissel : FAG*S services as seen from the IUGG/IAG,* FAGS Council, Toulouse (F), 20 mars 2000, IGN/LAREG, 2000.

[FEISSEL 00] M. Feissel : *Report on the poll about the role of IAG,* in Proc. IAG Retreat 2000, Pasadena (USA), 14-16 février 2000, IGN/LAREG, 2000.

[FEISSEL 00] M. Feissel : *Stabilité du repère de référence céleste international,* Journées Recherche de l'IGN, 15 mars 2000, IGN/LAREG, 2000.

[FEISSEL 00] M. Feissel : *Variabilité de radiosources extragalactiques compactes,* Séminaire Observatoire de la Côte d'Azur (F), 27 mars 2000, IGN/LAREG, 2000.

[FEISSEL 00] M. Feissel and A.-M. Gontier : *Stability of ICRF, a time series approach,* in Proc. GM2000 Meeting of the International VLBI Service for geodesy and astrometry (IVS), Kötzting (D), 21-25 février 2000, IGN/LAREG, 2000.

[FEISSEL, ALTAMIMI 00] M. Feissel and Z. Altamimi : *ITRF colocation sites,* ITRF Workshop, 2-3 novembre 2000, Marne-la-Vallée (F), IGN/LAREG, 2000.

[FEISSEL, WILLIS 00] M. Feissel and P. Willis : *Interaction between scientific research and services,* in Proc. DORIS Days, Toulouse (F), 2-4 mai 2000, IGN/LAREG, 2000.

[FUCHS 00] Frank Fuchs : *Efficient Subgraph Isomorphism with "A priori Knowledge", Application to 3-D Building Reconstruction for Cartography,* SSPR'2000, in Lecture Notes in Computer Science, n° 1876, laboratoire MATIS, IGN-SR 00-016/C-COM-FF, 2000.

[GLEYZE et al 00] J.-F. Gleyze, D. Allard & J.-N. Bacro : *Detecting regions of abrupt change : Wombling procedure and statistical significance,* in Proceedings GeoEnv'2000 (Third European Conference on Geostatistics for Environmental Applications, Avignon (F), novembre 2000, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-020/S-COM-JFG, 2000.

[GONTIER et al 00] A.-M. Gontier M. Feissel and N. Essaifi : *IVS Analysis Center OPAR at Paris Observatory,* Automatic analysis of the 24 hrs sessions (Poster), IGN/LAREG, 2000.

[GUIGUES, VIGLINO 00] L. Guigues & J.-M. Viglino : *Automatic Road Extraction through Light Propagation Simultation,* in International Archives of Photogrammetry an Remote Sensing XXXIII ISPRS, Amsterdam (NL), laboratoire MATIS, IGN-SR 00-011/C-COM-LG, juillet 2000.

[HANGOUËT 00] J.-F. Hangouët : *Storing Voronoi Diagrams in Geographical Databases,* 5th GeoComputation, August 2000, Chatham (UK), laboratoire COGIT, IGN-SR 00-038/S-COM-JFH, 2000.

[JIBRINI et al 00] H. Jibrini, M. Pierrot Deseilligny, N. Paparoditis & H. Maître : *Reconstruction de modèles de bâtiments à partir de données 2-D cadastrales vectorisées et d'images aériennes,* RFIA'2000, Paris (F), laboratoire MATIS, IGN-SR 00-001/C-COM-HJ, 2000.

[JIBRINI et al 00b] H. Jibrini, N. Paparoditis, M. Pierrot Deseilligny, et H. Maître : *Automatic Building Reconstruction from Very High Resolution Aerial Stereopairs Using Cadastral Ground Plans.* International Archives of Photogrammetry an Remote Sensing XXXIII ISPRS, Amsterdam (NL), laboratoire MATIS, IGN-SR 00-004/C-COM-HJ, juillet 2000.

[JIBRINI et al 00c] N. Paparoditis, Ch. Thom & H. Jibrini : *Surface reconstruction of urban areas from highly overlapping digital aerial images,* in International Archives of Photogrammetry an Remote Sensing XXXIII ISPRS, Amsterdam (NL), laboratoire MATIS, IGN-SR 00-005/C-COM-HJ, juillet 2000.

[KASSER 00] M. Kasser : *Emploi de methodologies GPS dans les SIG,* in Actes des conférences MARI, Paris (F), 18 avril 2000, Ed. Société Ortech, CD-ROM, 5 pages, IGN/LAREG, 2000.

[KASSER 00] M. Kasser : *Les journées GPS 2000 du Ministère de l'Équipement*, in Géomètre n° 8-9, août-septembre 2000, p. 16, IGN/LAREG, 2000.

[KASSER 00] M. Kasser : *New Modern Height Determination Techniques,* in Proceedings of the FIG Working Week Prague 2000, J. Weigel, Brno Univ. of Technology, CD-ROM, 6 pages, IGN/LAREG, 2000.

[KASSER 00] M. Kasser : *The new French policy for Geodesy and Levelling,* in Proceedings of the FIG Seminar "The Mediterranean Surveyor in the new millenium", Malta, 18-21 septembre 2000, 6 pages, IGN/LAREG, 2000.

[KOUBA et al 00] J. Kouba, M. Feissel and R. Neilan : *The IAG mission , role and organization from the perspective of IAG services,* in Proc. IAG Retreat 2000, Pasadena (USA), 14-16 février 2000, IGN/LAREG, 2000.

[LAGRANGE et al 00] F. Lagrange, S. Mustière & B. Landras : *Machine Learning Tachniques for Determining Parameters of Cartographic Generalisation Algorithms,* in International Archive of Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS'2000, 16-23 juillet 2000, Amsterdam (NL), vol. 33, part. B4, pp. 718-725, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-057/S-COM-FL, 2000.

[LE MEN, BOLDO 00] H Le Men & D. Boldo *: Mosaïque automatique d'orthophotographies*, in Actes RFIA'2000, Paris (F), vol. III, laboratoire MATIS, IGN-SR 00-002/C-COM-HL, février 2000.

[MARCHADIER et al 00] J. Marchadier, S. Michelin & Y. Egels : *A graph labelling approach for connected linear feature selection IAPR Workshop on Syntactic and Structural Pattern Recognition*, SSPR'2000, in Lecture Notes in Computer Science, n° 1876, laboratoire MATIS, IGN-SR 00-015/COM-JM, 2000.

[MOTET 00] S. Motet : *Multi-représentation : Projet MurMur,* Journées de la recherche Cassini, La Rochelle (F), septembre 2000, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-027/S-COM-SM, 2000.

[MUSTIÈRE et al 00] S. Mustière, J.-D. Zucker and L. Saitta : *Abstraction et Changement de Langage pour Automatiser la Généralisation Cartographique,* in Actes du 11ème congrès Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle (RFIA), Paris (F), février 2000, volume I, pp. 411-418, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-051/S-COM-SM, 2000.

[MUSTIÈRE et al 00] S. Mustière, L. Saitta & J.-D. Zucker : *Learning Abstraction and Representation Knowledge: an Application to Cartographic Generalisation,* 5th International Workshop on Multi-Strategy Learning, MSL'2000, Guimaraes (Portugal), laboratoire COGIT, IGN-SR 00-002/S-COM-SM, 2000.

[MUSTIÈRE, SAITTA 00] S. Mustière, L. Saitta : *An Abstraction-Based Machine Learning Approach to Cartographic Generalisation,* International Symposium on Spatial Data Handling, SDH'2000, Pékin (Chine), pp. 1a.50-63, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-049/S-COM-SM, 2000.

[NEILAN et al 00] R. Neilan, G. Beutler, M. Feissel, J. Kouba, C. Reigber and T. Springer : *GPS measurements of Earth rotation - The contributions of the International GPS Service,* European Geophys. Soc., avril 2000, Nice (F), IGN/LAREG, 2000.

[NOCQUET et al 00] J.-M Nocquet, E. Calais & Z. Altamimi : *Champ de vitesse en France et en Europe occidentale obtenus par différentes solutions de géodésie spatiale*, Réunion des Sciences de la Terre, Paris (F), 17-21 avril 2000, IGN/LAREG, 2000.

[NOCQUET et al 00] J.-M Nocquet, E. Calais, Z. Altamimi, : *Intraplate deformation in western Europe, Eos Trans. American Geophysical Union*, Fall Meet. Suppl., San Francisco (USA), 15-19 décembre 2000, IGN/LAREG, 2000.

[NOCQUET et al 00] J.-M Nocquet, E. Calais, Z. Altamimi, : *Velocity field in Western Europe and tectonics implications,* European Geophysical Society, Nice (F), 25-29 avril 2000, IGN/LAREG, 2000.

[PAPARODITIS et al 00] N. Paparodidis, C. Thom & H. Jibrini : *Surface reconstruction of urban areas from highly overmapping digital aerial images*, in International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing XXXIII ISPRS, Geoinformation for all, Amsterdam (NL), July 2000, laboratoire MATIS, IGN-SR 00-005/C-COM-NP, 2000.

[RUAS 00] A. Ruas : *The role of meso objects for generalisation,* in Proceedings of the International symposium on Spatial Data Handling, SDH'2000, Pékin (Chine), 200, 3b.50, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-053/S-COM-AR, 2000.

[SAITTA et al 00] L. Saitta, J.-D. Zucker & S. Mustière : *Abstraction et changement de langage pour automatiser la généralisation cartographique*, 11ème Congrès Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle, RFIA'2000, Paris (F), in Proceedings, vol. 1, pp. 411-418, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-051/S-COM-LS, 2000.

[WILLIS 00] P. Willis : *La campagne internationale GLONASS : IGEX-98,* in Revue Navigation, 48, 189, pp. 47-52, janvier 2000, IGN/LAREG, 2000.

[WILLIS 00] P. Willis : *L'impact en géodésie des systèmes de radionavigation par satellites, GPS et GLONASS, un défi pour Galileo,* NAVSAT'2000, Paris (F), juin 2000, in Revue XYZ, 84, 2000, 3, pp. 42-45, IGN/LAREG, 2000.

[WILLIS, DOX 00] P. Willis, J. DOW : *Potential interest of the IGS for the Galileo system,* l'IGS Analysis Workshop, Washington (USA), septembre 2000, GPS Solutions, 4, 2, IGN/LAREG, 2000.

Rapports de stages

[BARD 00] S. Bard : *Révision d'une base de connaissance : application à la généralisation cartographique,* mémoire de DESS MQGAE : Méthode quantitative pour la gestion et l'aménagement de l'espace, Université de Metz, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-010/S-STA-SB, 2000.

[BEAUMONT 00] N. Beaumont : *Fusion d'ortho-images,* stage de fin d'études d'ingénieur ESME Sudria, Université Paris-6, laboratoire MATIS, IGN-SR 00-003/C-STA-NB, 19 septembre 2000.

[COCHARD 00] S. Cochard : *Évaluation de la qualité des données géographiques,* rapport de stage, DESS mathématique et traitement du signal, Université du Littoral Côte d'Opale, Centre Universitaire de la Mi-Voix (Calais), laboratoire COGIT, IGN-SR 00-017/S-STA-SC, septembre 2000.

[DELATTRE 00] S. Delattre : *Modélisation des primitives surfaciques : approche par moments - Application à la qualification des liens d'appariements,* Université du Littoral Côte d'Opale, Centre Universitaire de la Mi-Voix (Calais), stage : Ingénierie, DESS (Analyse d'images), laboratoire COGIT, IGN-SR 00-022/S-STA-SD, 2000.

[DIMITRIJEVIC 00] I. Dimitrijevic : *Étude des liens d'appariement topologique et géométrique dans les bases de données géographiques,* rapport de stage de DESS Intelligence Artificielle, Université Paris-6, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-009/S-STA-ID septembre 2000.

[DOLLÉ 00] L. Dollé : *Cartographie du risque - représentation de l'aléa et de la vulnérabilité - exemple des accidents de la route,* rapport de stage de DESS IMST, Université de Nice Sophia Antipolis, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-019/S-STA-LD, septembre 2000.

[JAUFFRET 00] T. Jauffret : *Technique d'optimisation,* stage fin d'études d'ingénieur ESME Sudria, Université Paris-6, laboratoire MATIS, IGN-SR 00-008/C-STA-TJ, 29 septembre 2000.

[JUHAN 00] Juhan : *Appariement multi-stéréo de contours en utilisant l'espace objet*, rapport de stage, laboratoire MATIS, IGN-SR 00-019/C-STA-J, 2000

[LEPESANT 00] F. Lepesant : *Étude et réalisation d'un système de détection à photodiode à avalanche pour télémètre laser,* stage de fin d'études ingénieur ENSEA, laboratoire OEMI, IGN-SR 00-001/L-STA-FL, 28 juillet 2000.

[LOPES 00] P.-G. Lopes : *Modélisation approchée des scènes urbaines,* stage fin d'études d'ingénieur ESME Sudria, Université Paris-6, laboratoire MATIS, IGN-SR 00-007/C-STA-PGL, 15 septembre 2000.

[MANG 00] S. Mang : *Analyse des sites web en cartographie,* stage fin d'études d'ingénieur Génie Civil de l'École Centrale de Lyon, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-014/S-STA-SM, 13 juillet 2000.

[ROCCA SERRA 00] S. Rocca Serra : *Identification of spatial structures for urban zones generalization,* stage de fin d'études d'Ingénieur Agronome & Msc Geo Information, ENSAT (Toulouse), laboratoire COGIT, IGN-SR 00-013/S-STA-SRS, 2000.

[ROSNET 00] S. Rosnet : *Développement d'un algorithme de généralisation,* rapport de stage DUT Informatique, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-048/S-STA-SR, 2000.

Rapports internes et comptes rendus

[BRÉARD 00] J.-Y. Bréard : *Mise à jour en continu, aspects techniques. Étude préalable,* rapport technique interne, Direction Technique, IGN, mars 2000.

[DUQUESNOY 00] Th. Duquesnoy : *Validation du système Racal,* laboratoire OEMI, IGN-SR 00-003/L-RAP-TD, 2000.

[GLEYZE 00] J.-F. Gleyze : *Introduction au Risque*, IR2000/LaR, rapport interne, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-030/S-RAP-JFG, février 2000.

[GLEYZE 00] J.-F. Gleyze : *L'Analyse de vulnérabilité dans les études de risques,* rapport interne, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-031/S-RAP-JFG, juillet 2000.

[GUIGUES 00] L. Guigues : *Graphes, cocons et segmentation d'Images,* rapport interne, laboratoire MATIS, IGN-SR 00-017/C-RAP-LG, juin 2000.

[HOTTIER 00a] Ph. Hottier : *Aérotriangulation analytique, Simulations GPS absolu*, rapport interne, laboratoire MATIS, IGN-SR 012/C-RAP-PH, septembre 2000.

[HOTTIER 00b] Ph. Hottier : *Multicorrélation ponctuelle et précision sur le Mans,* laboratoire MATIS, IGN-SR 00-014/C-RAP-PH*,* 2000.

[HOTTIER 00c] Ph. Hottier : *Notions de photogrammétrie générale*, cours ENSG, laboratoire MATIS, IGN-SR 00-012/C-ENS-PH, 2000.

[HOTTIER 00d] Ph. Hottier : *Photogrammétrie analytique. Traitement des perspectives centrales*, rapport interne, laboratoire MATIS, IGN-SR 00-018/C-RAP-PH, 2000.

[JAKOBSSON, VAUGLIN 00] Jakobsson & F. Vauglin : *Report of a questionnaire on data quality in national mapping agencies,* rapport technique du groupe de travail du CERCO sur la qualité, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-039/S-RAP-XJ, août 2000.

[KASSER 00] M. Kasser : *Le Global Positioning System (GPS),* fiche technique du CNIG n° 36, 136 bis rue de Grenelle, 75700 Paris, 8 pages, IGN/LAREG, 2000.

[MurMur1 00] : *Analysis of the cartographic and risk-management case-studies,* Bruxelles (Belgique), laboratoire COGIT, IGN-SR 00-040/S-RAP-MUR, juin 2000.

[MurMur2 00] : *Users feedback on MurMur's data modelling approach,* Bruxelles (Belgique), laboratoire COGIT, IGN-SR 00-041/S-RAP-MUR, juin 2000.

[MurMur4 00] : *State-of-the-art review in spatio-temporal and multi-representation modeling,* Bruxelles (Belgique), laboratoire COGIT, IGN-SR 00-042/S-RAP-MUR, septembre 2000.

[MurMur5 00] : *A conceptual data model for MurMur,* Bruxelles (Belgique), laboratoire COGIT, IGN-SR 00-043/S-RAP-MUR, septembre 2000.

[MurMur6 00] : *Data acquisition specification,* Bruxelles (Belgique), laboratoire COGIT, IGN-SR 00-044/S-RAP-MUR, septembre 2000.