



HAL
open science

La recherche à l'IGN : activité 2002

Serge Motet, M Pierrot Deseilligny, Anne Ruas, Michel Kasser, Grégoire Maillet, David Flamanc, Didier Boldo, Olivier de Joinville, Sébastien Saur, Frédéric Bretar, et al.

► To cite this version:

Serge Motet, M Pierrot Deseilligny, Anne Ruas, Michel Kasser, Grégoire Maillet, et al.. La recherche à l'IGN : activité 2002. Bulletin d'information de l'IGN N°74. 2003. hal-02372813

HAL Id: hal-02372813

<https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-02372813v1>

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 2002

La recherche en 2002

01 Classement IGN-SR : 03-001/R-LIV

02 Livre

03 Nom et adresse du directeur de la publication

Jacques Poulain
IGN, Direction Technique
2-4 avenue Pasteur
F-94165 SAINT MANDE CEDEX

04 Rédacteur en chef

Serge Motet
IGN, Direction Technique, Service de la Recherche
2-4 avenue Pasteur
F-94165 SAINT MANDE CEDEX

05 Réalisé au Service de la Recherche de l'IGN

Institut Géographique National
2-4 avenue Pasteur
F-94165 SAINT MANDE CEDEX

06 Titre : *La recherche en 2002*

07 Date d'édition : 2003/3

13 Numéro 74

15 Nom de la collection : *Bulletin d'Information de l'IGN*

Résumé

Ce numéro 74 dresse le bilan de l'activité de recherche en 2002 à l'Institut Géographique National. Outre le bilan des quatre laboratoires de l'IGN, il présente des résultats concernant la restitution automatique des bâtiments en trois dimensions, l'orthophotographie à grande échelle, le levé laser aéroporté, la prise de vue aérienne numérique en infrarouge, la correction des mesures issues du GPS, l'unification d'informations géographiques, l'ordonnement puis l'évaluation des outils de généralisation automatique, les logiciels pour l'Internet consacrés à l'information géographique, la mesure du champ de pesanteur terrestre et de la rotation de la Terre ainsi qu'une analyse de risque appliquée au réseau de métro parisien.

En couverture

Indice de centralité intermédiaire sur le réseau métro+RER de Paris *intra-muros* dans une logique de desserte uniforme du territoire. Les valeurs obtenues correspondent à la densité de probabilité de fréquentation des stations et des arcs du réseau pour un déplacement aléatoire sur le territoire. La loi probabiliste d'un tel déplacement est telle que les stations de départ et d'arrivée sont les accès au réseau les plus proches d'un couple origine-destination tiré aléatoirement sur le territoire parisien. La gamme des valeurs s'étend de 0 à 25% (du jaune clair au marron foncé). Seule une partie du réseau est présentée ici sur un extrait IGN du plan de Paris centré sur le 1^{er} arrondissement.

Mot-clé principal : Information géographique.

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

Abonnement gratuit, courrier & publications, s'adresser à :

Isabelle Melot
IGN, Direction Technique,
2-4 avenue Pasteur
F-94165 SAINT MANDE CEDEX
isabelle.melot@ign.fr

Table des matières

A. Bilan	1
A.1 La recherche à l'IGN (<i>S. Motet</i>)	1
A.2 Les travaux du laboratoire MATIS (<i>M. Pierrot Deseilligny</i>)	5
A.3 Les travaux du laboratoire OEMI (<i>Ch. Thom</i>)	7
A.4 Les travaux du laboratoire COGIT (<i>A. Ruas</i>)	9
A.5 Les travaux du laboratoire LAREG (<i>M. Kasser</i>)	13
<hr/>	
B. Quelques actions marquantes	15
B.1 Prototype de logiciel pour la réalisation de BD Bâti 3-D (<i>G. Maillet & D. Flamanc</i>)	15
B.2 Fabrication de vraies ortho-images et correction des ombres (<i>D. Boldo</i>)	25
B.3 Le levé laser aéroporté : techniques, applications et recherche (<i>O. de Joinville, S. Saur & F. Bretar</i>)	37
B.4 Un canal proche infrarouge pour la caméra numérique de l'IGN (<i>J.-Ph. Souchon & Ch. Thom</i>)	53
B.5 Développement d'un lidar Raman pour le sondage de la vapeur d'eau et la correction des délais troposphériques en GPS (<i>O. Bock, J. Tarniewicz, Y. Morille, J. Pelon & Ch. Thom</i>)	63
B.6 Unification des bases de données géographiques (<i>S. Mustière, N. Gesbert & D. Sheeren</i>)	71
B.7 L'évaluation de la généralisation (<i>S. Bard</i>)	79
B.8 Coordination multi-agents pour la généralisation automatique (<i>C. Duchêne</i>)	87
B.9 Fonctionnalité et vulnérabilité du réseau de métro parisien (<i>J.-F. Gleyze</i>)	97
B.10 « Oxygène » : une plate-forme inter-opérable pour le déploiement de services Web géographiques (<i>Th. Badard & A. Braun</i>)	113
B.11 Simulation du champ de pesanteur à partir d'un modèle géologique en trois dimensions : un outil pour l'évaluation des méthodes de calcul de géoïde (<i>O. Jamet</i>)	123
B.12 Combinaison de séries temporelles des positions des stations et des paramètres de rotation de la Terre (<i>Z. Altamimi</i>)	131
<hr/>	
C. Publications	134
Thèses de doctorat	134
Rapports de mi-thèse (doctorats)	135
Articles (journaux scientifiques)	135
Autres articles	136
Articles parus dans ce bulletin	136
Communications à congrès	137
Livres	138
Chapitres de livres	139
Rapports de stage	139
Rapports internes & comptes rendus	140

Ce bulletin n°74 dresse le bilan des activités menées en 2002 par l'Institut Géographique National (IGN) dans le cadre de sa mission de recherche.

La recherche de l'IGN se caractérise par ses domaines de compétence et ses finalités.

Les domaines sont ceux qu'utilisent l'IGN dans son activité de production : instrumentation pour la topographie et la localisation, photogrammétrie, traitement d'image, système d'information géographique, cartographie et géodésie.

Concernant les finalités, elles sont déterminées en fonction d'une activité future. Plus précisément, les connaissances développées par l'IGN visent :

- à l'amélioration de la productivité de l'IGN, par exemple : les études sur la détection de changements et la mise à jour des bases de données ;
- au développement de nouveaux produits, par exemple : les images de la caméra numérique ou la diffusion des mises à jour ;
- à l'émergence des applications, par exemple : les études sur les risques.

Organisation de la recherche

L'IGN est un établissement public à caractère administratif, dont une des missions est la recherche. Cette recherche est mise en œuvre au sein de quatre laboratoires :

- le *laboratoire MATIS* : (Méthodes d'Analyse et de Traitement d'Images pour la Stéréorestitution) pour la photogrammétrie et l'analyse d'image ;
- le *laboratoire OEMI* (Laboratoire d'OptoÉlectronique et de Micro-Informatique) pour l'instrumentation et les capteurs ;
- le *laboratoire COGIT* (Conception Objet et Généralisation de l'Information Topographique) pour les systèmes d'information géographique et la cartographie ;
- le *laboratoire LAREG* (LABoratoire de REcherche en Géodésie) pour la géodésie.

Les trois premiers laboratoires se trouvent à Saint-Mandé (Val-de-Marne, 94). Le laboratoire LAREG est une unité de l'École nationale des sciences géographiques (ENSG) et se situe donc à Marne-la-Vallée (Seine et Marne, 77).

L'orientation et l'évaluation de la recherche sont soumises à un Comité scientifique et technique placé auprès du Directeur général.

Quelques points marquants

En traitement d'image, l'année a été marquée par le démarrage significatif des études sur le laser aéroporté et le lancement des recherches sur les modèles de bâtiments à partir de données issues de levés terrestres, photogramétriques ou laser.

En instrumentation, on notera les premiers résultats de l'activité d'analyse de concentration de vapeur d'eau qui vise à améliorer la mesure de l'altitude par GPS.

En information géographique, on citera la fin d'un projet européen sur l'intégration d'information à plusieurs échelles et le lancement d'un nouveau projet sur un moteur de recherche géographique sur l'Internet.

En géodésie, on retiendra une contribution de la géodésie spatiale à la connaissance des mouvements de la plaque européenne.

Effectifs

Les effectifs de recherche restent constants depuis 1994. Le tableau A1 donne leur répartition pour l'année 2002 dans les différents laboratoires et les différentes catégories.

tableau A.1 : effectifs 2002

		<i>chercheurs</i>	<i>dont thésards</i>	<i>dont CdR</i>	<i>Etude</i>	<i>support</i>	<i>TOTAL</i>
MATIS	1 janvier	17	7	1	2	1	20
	31 déc.	19	7	3	2	1	22
LOEMI	1 janvier	4	1	1	0	2	6
	31-déc.	4	0	0	0	2	6
COGIT	1 janvier	17	9	4	1	1	19
	31 déc.	17	8	4	1	1	19
LAREG	1 janvier	10	5	3	0	3	13
	31 déc.	7	1	1	0	2	9

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 d'étudiants de troisième cycle qui ont fait un stage dans les laboratoires n'apparaissent pas dans le tableau.

Résultats

Publications

La liste des publications se trouve en partie C, à la fin de ce bulletin.

Doctorats

Sept thèses ont été soutenues en 2002.

tableau A.2 : doctorats soutenus en 2002

	Date de soutenance	Titre de la thèse
Olivier Bonin	4 janvier	Modèle d'erreurs dans une base de données géographiques et grandes dérivations pour des sommes pondérées. Application à l'estimation d'erreurs sur un temps de parcours.
Jocelyn Marchadier	12 avril	Modélisation fonctionnelle et topologique pour la vision par ordinateur : application au relèvement de clichés urbains.
Hassan Jibrini	29 avril	Reconstruction automatique des bâtiments en modèles polyédriques 3-D à partir de données cadastrales vectorisées 2-D et d'un couple d'images aériennes à haute résolution.
Didier Boldo	14 juin	Fabrication conjointe de modèle numérique de surface et d'ortho-image pour la visualisation perspective des scènes urbaines.
Jean Mathieu Nocquet	24 juin	Mesure de la déformation crustale en Europe occidentale par géodésie spatiale.
Bénédicte Bucher	25 juin	L'aide à l'accès à l'information géographique : un environnement de conception coopérative d'utilisations de données géographiques.
Sébastien Drot	5 décembre	Segmentation d'images d'observation de la Terre par des techniques de géométrie stochastique.

Contrats de recherche

L'IGN a participé à trois projets de recherche soutenus par la Commission européenne :

- le projet *MurMur* (IST-1999-10723) traite de la représentation multiple de l'information géographique. Trois maquettes ont été développées pour la conception, l'interrogation et la visualisation combinant plusieurs échelles. Ces maquettes utilisent les bases de données BD Carto et BD Topo de l'IGN ;
- le projet *V-Planet* (IST-2000-28095) développe un logiciel pour visualiser des données géographiques 3D. L'IGN contribue comme utilisateur des résultats futurs ;
- le projet *Spirit* (IST-2001-35047) porte sur un moteur de recherche de documents ou de données sur l'Internet, spécialisé dans l'interrogation sur des critères de localisation ou de lieu.

Au niveau national, les principales activités de valorisation concernent :

- des activités d'expertise et d'aide à la maîtrise d'ouvrage en photogrammétrie et traitement d'images au profit de la Défense ;
- la poursuite de la collaboration avec le CNES et l'ONERA dans le cadre du projet *Pelican*, fondé sur les travaux du Laboratoire OEMI sur les caméras numériques.

Projets internes

Quatre projets visant à transférer des résultats de recherche vers la production sont en cours :

Le projet « *Caméra numérique* » porte sur l'environnement logiciel des caméras numériques, avec comme objectif de rendre autonome le Service des activités aériennes de l'IGN.

Le projet « *Unification des Bases de Données* » concerne la future base de données unifiée, résultant de l'unification de BD Topo, Géoroute et BD Carto dans un premier temps, complétée par la BD parcellaire-vecteur. Il s'agit de mettre en place des outils de constitution initiale de cette base, son système de gestion et les outils pour la mettre à jour depuis des postes de saisie délocalisés dans les départements et d'assurer la continuité du service de diffusion.

Le projet « *Diffusion des données* » développe des processus automatiques de documentation, d'archivage et de diffusion des données. Ces développements visent à améliorer la circulation de l'information à l'intérieur de l'IGN et la diffusion sur l'internet.

Le projet « *Carto 2001* » a pour objectif d'automatiser la rédaction des cartes aux moyennes échelles, en s'appuyant sur les résultats des recherches en généralisation.

Le thème de l'extraction d'information 3-D par photogrammétrie est la dominante du laboratoire MATIS. Tout en conservant cette spécialisation reconnue, nous nous sommes fixés, comme objectif en 2001, de diminuer à moyen terme cette prépondérance un peu exclusive. Cet objectif de diminuer la part du 3-D est provisoire, le temps de faire un bilan de l'ensemble des outils de photogrammétrie disponibles au laboratoire et d'acquérir un minimum d'expertise sur le laser.

Ce cap annoncé en 2001 a été globalement tenu en 2002. Il n'y a pas eu d'affectation de nouveaux chercheurs sur les actions spécifiquement 3-D et stéréoscopie. Il n'y a pas eu de remplacement, ni de Frank Fuchs (parti du laboratoire MATIS), ni de Nicolas Paparoditis (travaillant maintenant exclusivement sur l'action de recherche « *Photogrammétrie Architecturale* »).

A priori, on pense avoir atteint un niveau stable et ne pas modifier, en 2003, les ressources allouées à ces axes. Il y aura lieu de faire un bilan fin 2003, au vu des essais d'intégration dans la maquette et des différentes études effectuées sur le laser.

Comme prévu en 2001, plusieurs travaux sont effectués sur les données laser provenant de différentes sources (Toposys et Leica essentiellement). Il s'agit de la thèse de Frédéric Bretar sur la synergie entre laser et photogrammétrie, de l'étude de Sébastien Saur sur la mise à niveau de la couche altimétrique du RGE et d'un stage encadré par Olivier de Joinville sur la comparaison entre laser et corrélation.

Une évolution importante est l'apparition d'une nouvelle action de recherche « *Photogrammétrie architecturale* », autour de la modélisation très grande échelle, à partir de données terrestres. C'est une action amont puisqu'il s'agit d'étudier la faisabilité de produits qui n'existent pas encore et non d'améliorer les méthodes de fabrication des produits existants.

Les travaux sur la vectorisation du cadastre avaient été mis entre parenthèses depuis quelques années, car les recherches s'étaient concentrées sur la mise en géométrie du cadastre dans le cadre du RGE. Ce problème étant *a priori* résolu du point de vue de la recherche, Jean-Marc Viglino a recommencé les recherches sur l'interprétation des principaux éléments thématiques du cadastre (bâti et parcellaire).

Thèses soutenues

Les quatre thèses suivantes ont été soutenues en 2002 :

- [BOLDO 02] Didier Boldo : *Fabrication conjointe de modèle numérique de surface et d'ortho-image pour la visualisation perspective des scènes urbaines*, thèse de l'Université Paris-5, René Descartes, 2002.
- [DROT 02] Sébastien Drot : *Segmentation d'images d'observation de la Terre par des techniques de géométrie stochastique*, thèse de l'Université de Nice-Sophia-Antipolis, 2002.
- [JIBRINI 02] Hassan Jibrini : *Reconstruction automatique des bâtiments en modèles polyédriques 3-D à partir de données cadastrales vectorisées 2-D et d'un couple d'images aériennes à haute résolution*, thèse de l'École Nationale Supérieure des Télécommunications, 2002.
- [MARCHADIER 02] Jocelyn Marchadier : *Modélisation fonctionnelle et topologique pour la vision par ordinateur: Application au relèvement de clichés urbains*, thèse de l'Université de Marne-la-Vallée, 2002.

Nouvelles thèses

Trois thèses commencent cette année au laboratoire MATIS :

- thèse de Frédéric Bretar, co-dirigée par Michel Roux (ENST) et Marc Pierrot Deseilligny, sur l'utilisation conjointe de photographies et de données laser ;

- thèse de Ouided Bentrach, en collaboration avec l'INRIA, sous la direction de Radu Horaud, sur le géo-référencement précis de photographies de façades prises d'un véhicule mobile ;
- thèse de Roger Triaz-Sanz, en collaboration avec l'Université Paris-5, sous la direction de Jean Louchet, sur l'interprétation d'occupation du sol par utilisation conjointe de photographies aériennes numériques et de données parcellaires.

Publications du laboratoire MATIS

La liste des publications du laboratoire se trouve en fin de Bulletin, au chapitre C.

On peut classer les actions de recherche du Laboratoire OEMI dans deux domaines d'activité de l'IGN : la photogrammétrie et la métrologie/positionnement.

Photogrammétrie

Amélioration et exploitation des caméras numériques

Les recherches consacrées à la caméra numérique, poursuivies depuis 1991, visent à la réalisation d'un prototype de caméra numérique destinée à remplacer les actuelles chambres de prise de vue à film argentique.

Les années passées, le laboratoire a réalisé successivement un prototype de caméra panchromatique, un autre prototype basé sur un capteur couleur, puis en 2000 un système multi-canaux, c'est-à-dire de plusieurs caméras synchronisées permettant d'obtenir des images en vraie couleur. L'année 2002 a principalement été consacrée à la fiabilisation des caméras, au test d'un nouveau type d'objectif et à la réalisation de missions à quatre canaux spectraux, incluant le proche infrarouge.

La part de travail consacrée à la production de caméras proprement dite reste importante, même si les efforts de sous-traitance ont porté leurs fruits. La collaboration engagée avec le CNES et l'ONERA, dans le cadre de leurs simulations d'images à haute résolution, a été formalisée par un protocole. Elle se concrétise par la mise à disposition du CNES d'un système à quatre canaux, dont la mission de recette a eu lieu, cette année, sur la région de Manosque.

Métrologie-positionnement

Altimétrie GPS

Après les simulations réalisées en 2000, montrant l'impact de la variabilité de la concentration de vapeur d'eau sur les mesures GPS, la construction du LIDAR a été entreprise. Un prototype a été testé lors de l'expérimentation ESCOMPTE en mai-juin 2001, puis en octobre 2002 au CNRM de Toulouse, où il a contribué à l'étalonnage d'un senseur spatial de vapeur d'eau AIRS.

Les résultats sont encourageants, mais ont montré l'importance des procédures d'étalonnage. Un protocole de collaboration avec le Service d'Aéronomie, faisant suite au changement de statut du responsable de la recherche (O. Bock), a été signé. La nouvelle activité « *LIDAR et analyse de l'atmosphère* » est maintenant bien engagée et commence à produire des résultats intéressants. Il reste à finaliser les procédures d'étalonnage du système, et à concrétiser son application à l'amélioration des mesures GPS.

Photo-théodolite astronomique

Cette action de recherche, commencée fin 2002, a pour but d'évaluer la déviation de la verticale par un procédé entièrement automatique. Elle exploite les possibilités de positionnement et de datation du GPS couplées aux capacités de pointage et de mesure de la verticale d'un théodolite motorisé. Ceci permettra de parfaire la fameuse grille de correction altimétrique, pour passer des altitudes GPS aux altitudes tirées du nivellement. Son avancement à l'heure actuelle n'est pas suffisant pour en tirer des conclusions.

Station Laser Mobile

Cette action de recherche reprend l'idée de construire une Station Laser Mobile semblable à celle qui l'avait été, il y a quelques années, en collaboration avec l'Observatoire de la Côte d'Azur. Celle-ci fonctionne en routine avec des performances comparables, sinon meilleures à celles des stations fixes. Malheureusement, elle est trop occupée pour permettre à l'IGN de l'utiliser de manière significative.

De plus, la maintenance de la tourelle ne peut plus être assurée à cause de la disparition du constructeur. Il est donc nécessaire de reprendre la fabrication d'une nouvelle station. Un stage en 2002 a permis d'explorer différentes possibilités de réalisation, depuis la sous-traitance totale, jusqu'à la réalisation à l'IGN.

C'est vers cette dernière solution que nous nous orientons, en tout cas pour la construction d'un prototype permettant de tester une idée facilitant énormément la construction d'une telle station.

Publications du laboratoire OEMI

La liste des publications du laboratoire se trouve en fin de Bulletin, au chapitre C.

Le laboratoire COGIT travaille sur la gestion, l'accessibilité et l'utilisation des bases de données vectorielles de type topographique. Les recherches sont structurées en cinq actions de recherche composées de trois à cinq personnes, et une étude. Chaque action de recherche est dirigée par un ingénieur docteur de l'IGN. Les doctorants sont encadrés par un directeur de thèse universitaire et par un ingénieur/docteur du COGIT.

Actions de recherche du laboratoire

Le laboratoire travaille sur cinq actions de recherche :

- « *Évolution* » : étude des processus de mise à jour et analyse des données d'évolution ;
- « *Unification* » : étude de la gestion des bases de données unifiées (création et utilisation) ;
- « *Généralisation* » : étude de l'automatisation de la généralisation ;
- « *Consultation* » : étude des méthodes d'accès à l'information géographique (données et traitements) ;
- « *Risques* » : étude de l'usage des données dans certaines applications liées aux risques.

Les actions de recherche sur l'évolution, l'unification et la généralisation sont trois actions de recherches complémentaires dont les résultats devraient, à terme, faciliter la gestion des Bases de Données IGN unifiées : création, contrôle de cohérence, mise à jour et dérivation.

Actuellement, les recherches sur les mises à jour se concentrent sur de faibles changements de résolution (par exemple entre la BD Pays et la BD 25), les recherches en généralisation proposent des solutions entre les Bases de Données IGN : BD Pays → BD 25, BD 50, BD Carto → BD 100, BD 250) alors que les recherches en unification concernent des bases qui ont un facteur plus grand de changement de niveau de détail (exemple : BD Pays et BD Carto). La mise en commun des résultats de ces actions de recherche se fera dans le temps, même si elles visent un but commun qui est la gestion et l'utilisation des bases de données ayant différents niveaux de détail.

L'action de recherche sur les risques permet d'étudier certaines problématiques liées à l'utilisation des données IGN. Cela peut concerner une mise en cohérence de données (MNT et 2-D), la propagation des incertitudes lors de calculs probabilistes ou l'ajout de méthodes d'analyse sur nos données (les données routières).

Enfin l'action de recherche sur la consultation étudie les informations et les méthodes qu'il faut ajouter entre les BD IGN et un utilisateur pour proposer des informations qui répondent au mieux aux besoins des utilisateurs. Cela passe par exemple par une meilleure présentation des méta-données et par la conception d'interfaces plus intuitives. De plus, une étude sur la cartographie au 1 : 25 000 et 1 : 50 000, à partir de la BD Pays, a été réalisée courant 2002.

Ce Bulletin d'Information présente une partie des résultats 2002, notamment sur la généralisation (articles de Cécile Duchêne et Sylvain Bard), sur les principes de l'unification des bases (article de Sébastien Mustière), sur la gestion des risques (articles de Jean-François Gleyze) et sur la conception d'une nouvelle plate-forme de recherche (article de Thierry Badard et Arnaud Braun). Les recherches sur la consultation et sur les évolutions sont présentées dans ce Bulletin et dans le précédent.

Quelques aspects marquants de 2002

Des soutenances de thèses

- Olivier Bonin : soutenance de thèse de doctorat le 4 janvier 2002 en Statistique, sous la direction de Monsieur Daniel Pierre-Loti-Viaud, Université Paris-6, LSTA : *Modèles d'erreurs dans une base de données géographiques et grandes déviations pour des sommes pondérées ; application à l'estimation d'erreurs sur un temps de parcours*. Thèse accessible sur le serveur : <ftp://ftp.ign.fr/ign/COGIT/THESES> ;
- Bénédicte Bucher : soutenance de thèse de doctorat le 25 Juin 2002 en Informatique, sous la direction de Monsieur François Bouillé, Université de Paris-6 : *L'aide à l'accès à l'information géographique : un environnement de conception coopérative d'utilisations de données géographiques*. Thèse accessible sur le serveur : <ftp://ftp.ign.fr/ign/COGIT/THESES>.

De nouvelles thèses

- Elisabeth Chesneau, sous la direction de Gilles Palski, inscription à l'Université de Marne-la-Vallée en Informatique spécialité SIG. *Conception sémiologie graphique adaptée à l'étude des risques*. L'objectif de la thèse est de proposer des moyens permettant la conception de légendes permettant de visualiser les informations liées au risque (aléa et vulnérabilité) ainsi que le contexte topographique (données vectorielles) ;
- Yann Abd El Kader, sous la direction de Marinette Revenu, inscription à l'Université de Caen en Informatique. L'objectif de la thèse est de créer des méta-données sur les traitements SIG afin de faciliter l'aide à l'accès, d'une part, en construisant des méthodes permettant d'analyser les programmes existants, d'autre part, en se construisant un modèle de tâches géographiques à partir du travail de doctorat de Bénédicte Bucher.

La conception d'une nouvelle plate-forme de recherche

Afin de permettre une meilleure interopérabilité des codes et des schémas développés au laboratoire COGIT, une nouvelle plate-forme SIG, Oxygène, est en cours de conception au laboratoire. Cette plate-forme comporte un schéma cœur en Java conçu à partir des directives de l'Open GIS et un schéma utilisateur de type cartes topologiques accessible aux chercheurs. Les schémas et méthodes sont écrites en Java et les données sont stockées sur le SGBD Oracle. Cette nouvelle plate-forme accueille les recherches relatives aux évolutions, à l'unification et aux risques. Un article dans ce Bulletin, présente plus en détail son contenu.

La fin de l'étude sur la cartographie à partir de la BD Pays

La BD Pays ayant un contenu moindre en information que la BD Topo, cette étude avait pour objectif d'analyser et de proposer des produits cartographiques à partir de ces nouvelles données. Deux aspects principaux ont été étudiés: la première est la mise au point de procédures pour s'approcher du contenu cartographique des cartes existantes (par exemple, en récupérant le thème de l'occupation des sols à partir d'images), la deuxième est une comparaison quantitative puis qualitative des produits nouveaux par rapport aux produits que l'on pouvait faire à partir de la BD Topo.

Les rapports fournissent des éléments de réflexion pour l'IGN ainsi que des solutions innovantes.

La publication de deux ouvrages Hermès/Lavoisier

Deux ouvrages Hermès ont été publiés en 2002 :

- « *SIG : outils, concepts et données* », écrit par Patricia Bordin. Cet ouvrage présente les SIG d'abord dans une approche conceptuelle, puis de façon pratique en développant les composantes techniques principales : les applications, les données, les logiciels, 258 pages ;
- « *Généralisation et Représentation Multiple* », ouvrage coordonné par Anne Ruas. Cet ouvrage présente deux grands courants actuels en terme d'adaptation des bases de données géographiques : le processus de généralisation qui consiste à abstraire (réduire, simplifier) l'information disponible, le processus de représentation multiple qui consiste à faire coexister plusieurs représentations du territoire concerné pour faciliter certaines opérations faites sur ces données. Vingt et un chapitres, quarante et un auteurs, 390 pages. Traité IGAT Série Géomatique.

Le personnel du laboratoire COGIT

En début 2003, le laboratoire COGIT sera composé de vingt et une personnes « sur site », dont onze personnes en thèse :

- treize ingénieurs, dont cinq docteurs responsables des cinq actions de recherche ;
- trois en thèse ;
- quatre ingénieurs d'étude ;
- un ingénieur pour la maintenance informatique ;
- huit universitaires (dont cinq CDD IGN) :
 - deux en première année ;
 - trois en deuxième année (dont un sous financement DGA) ;
 - un en troisième année ;
 - deux en fin de thèse, la thèse devant être soutenue courant 2003.

Par ailleurs, deux ingénieurs (Direction Technique et ENSG) participent également aux recherches du laboratoire.

Action de recherche « *Évolution* »

- Thierry Badard : Ingénieur TPE, Docteur, responsable de l'action de recherche ;
Patricia Bordin : Ingénieur IPC, deuxième année de thèse de doctorat (Lena Sanders) ;
Arnaud Braun : Ingénieur IGN ;
Hakima Kadri-Dhamani : ATER, dernière année de thèse de doctorat (Philippe Dague), soutenance mi-2003.

Action de recherche « *Unification* »

- Sébastien Mustière : Ingénieur IGN, Docteur, responsable de l'action de recherche ;
David Sheeren : Deuxième année de thèse de doctorat (CDD) (Jean-Daniel Zucker) ;
Nils Gesbert : Deuxième année de thèse de doctorat (CDD) (Thérèse Libourel).

Action de recherche « *Généralisation* »

- Anne Ruas : Ingénieur IGN, Docteur, responsable de l'action de recherche ;
Cécile Duchêne : Ingénieur IGN, troisième année de thèse de doctorat (J.-P. Briot & C. Cambier) ;
Sylvain Bard : Troisième année de thèse de doctorat (CDD) (Bernadette Bouchon-Meunier) ;
Xavier Barillot : Ingénieur IGN ;
Jean-George Affholder : IGPC, rattaché à la direction technique.

Action de recherche « *Risques* »

- Olivier Bonin : Ingénieur IGN. Docteur. Responsable de l'action de recherche ;
Jean-François Gleyze : Ingénieur IPC. Dernière année de thèse de doctorat (Claude Grasland) ;
Frédéric Rousseaux : Deuxième année de thèse de doctorat. Financement DGA (Bernard Cervelle) ;
Elisabeth Chesneau : Première année de thèse de doctorat (CDD) (Gilles Palski).

Action de recherche « *Consultation* »

- Bénédicte Bucher : Ingénieur IPC, Docteur, responsable de l'action de recherche ;
Sandrine Balley : Ingénieur IGN ;
Frédéric Hubert : Dernière année de thèse de doctorat. Soutenance prévue au printemps 2003 (Anne Nicolle) ;
Yann Abd El Kader : Première inscription en thèse de doctorat (CDD) (Marinette Revenu);
Stéphane Pelle : Ingénieur IGN - ENSG.

Cartographie à partir de la BD PAYS

- Jenny Trévisan : Ingénieur IGN.

Ingénieur de maintenance & de documentation du laboratoire COGIT

- Vincent Beauce : Ingénieur IGN.

Les collaborations du laboratoire COGIT

Les projets Européens

Projet *MurMur*

Projet Européen 10723, début : 1^{er} janvier 2000, fin : 31.12.2002 : <http://lbsun.epfl.ch/e/MurMur/>. Ce projet avait pour objectif de développer un atelier de génie logiciel (AGL) permettant, d'une part, de porter la représentation multiple pour les données géographiques en se basant sur le formalisme MADS et, d'autre part, d'assurer un lien dynamique entre le schéma et les données stockées sur le SGBD Oracle. En deux mots, le schéma est conçu sur l'AGL, les tables oracles sont dérivées automatiquement de ce schéma conceptuel, les données sont instanciées dans les tables Oracle - après avoir été appariées par un logiciel externe pour assurer la représentation multiple - puis l'AGL est utilisé pour accéder aux données et poser des requêtes sur les données de la base. Le projet s'est terminé fin décembre 2002.

Il a permis au laboratoire COGIT d'acquérir de nombreuses connaissances en représentation multiple, utiles pour l'action de recherche sur l'unification. Il a permis également la conception d'un prototype qui sera utilisé en recherche pour les besoins en modélisation.

Projet SPIRIT

Projet Européen IST 2001- 35047, début : avril 2002. Fin : mars 2005 : <http://www.geo-spirit.org/>. Ce projet a pour objectif de réaliser un moteur de recherche géographique sur le Web pour trouver des documents Web et des données géographiques à partir d'une requête.

Pour ce faire, différents aspects doivent être étudiés dont l'existence :

- d'une ontologie géographique permettant de stocker et de relier des concepts et des instances géographiques ;
- de méta-données géographiques permettant de décrire des lots de données existants ;
- d'une interface utilisateur permettant la saisie de requêtes, l'interprétation des requêtes en se basant sur l'ontologie et la présentation structurée des résultats ;
- d'un système d'indexation des sites Web ;
- d'un moteur de recherche permettant de trouver les pages les plus proches des requêtes utilisateurs.

En guise d'application, les partenaires se concentreront sur les applications touristiques. Partenaires : Université de Cardiff (C. Jones), Université de Sheffield (M. Sanderson), Université de Hanovre (M. Sester), Université de Zürich (R. Weibel), Université d'Utrecht (M. van Krefeld), Laboratoire COGIT (A. Ruas : responsable administratif ; B. Bucher : responsable technique).

SIGMA - Cassini

SIGMA est un Groupe de Recherche (GdR 2340) du CNRS regroupant un ensemble de chercheurs français autour de l'information géographique. Il est composé de chercheurs en informatique (section 7) et en géographie (section 39) provenant du CNRS, ainsi que d'organismes ayant des activités de recherche en géomatique tels que : le CEMAGREF, l'ENSAM, l'École des Mines, l'École Navale, le CIRAD, l'IFREMER, l'INRA et le laboratoire COGIT.

Le GdR Sigma organise les « Journées Cassini » qui est un colloque français sur les SIG, organise des groupes de discussions sur un ensemble de thèmes - dont l'analyse spatiale, la qualité - et participe activement à la revue internationale de Géomatique. Le laboratoire COGIT participe à toutes les activités de Sigma et l'IGN finance en partie le programme GTEM : Géomatique; Espace; Territoire et Mobilité : <http://cassini.univ-lr.fr/>.

Les REX

Les REX sont des réseaux de recherche européens financés par la commission européenne dans le cadre du sixième PCRD. Fin 2002, un certain nombre de propositions ont été faites auprès de la CEE. Le nombre de propositions étant beaucoup plus important que prévu des regroupements de propositions vont certainement s'opérer en 2003. Le laboratoire COGIT est membre de quatre propositions initiales :

- 4S : Modélisation spatial pour les sciences sociales (Denise Pumain) ;
- QUALITY GIS : Qualité de l'information géographique (Robert Jeansoulin) ;
- AGINET : L'information géographique (GdR SIGMA + association AGILE) ;
- ADIAMO : Etude des risques urbains (Christiane Weber).

Groupes de travail de l'ACI

Le laboratoire COGIT participe activement à la commission sur la généralisation de l'ACI (Robert Weibel et Diane Richardson). La prochaine session de travail aura lieu à l'IGN les 28, 29 et 30 avril 2003. Une participation plus active est prévue en 2003 dans le groupe de travail sur la mise à jour (Ammatzia Peled).

Le laboratoire COGIT suit également les activités du groupe de travail sur la geo-visualisation (J.M. Kraak et McEachren).

Publications du laboratoire COGIT

La liste des publications du laboratoire se trouvent en fin de Bulletin, au chapitre C.

A.5 Les travaux du laboratoire LAREG

Michel Kasser (responsable du thème Géodésie)

Introduction

En 2002, le LAREG (Laboratoire de Recherches en Géodésie) a généralement poursuivi ses activités dans ses quatre domaines habituels de recherche : Systèmes de références, Géodésie spatiale, Géodynamique et Géodésie physique (étude du champ de pesanteur terrestre).

Actions de recherche et effectifs du laboratoire LAREG

Dans les quatre différents domaines de recherche évoqués ci-dessus, les effectifs du laboratoire LAREG se répartissent de la manière suivante à la fin 2002 :

Systèmes de références

Z. Altamimi et B. Garayt, ITGCE chercheurs.

Géodésie Spatiale

M. Feissel-Vernier (astronome à l'Observatoire de Paris) et M. Kasser, chercheurs,
M. Laplanche, observateur à l'OCA, D. Coulot, K. Le Bail et M.A. Sammuneh, doctorants

Géodynamique

M.-N. Bouin (IPC), chercheuse,
J.-M. Nocquet (ITGCE), doctorant (jusqu'en septembre 2002).

Géodésie Physique

O. Jamet (ICPC), chercheur,
B. Langellier (ITGCE), ingénieur au BGI (Toulouse),
I. Panet, doctorante (depuis novembre 2002).

En outre, C. Granger-Gardère assure le secrétariat du laboratoire LAREG.

On notera le départ de P. Nicolon après réussite de son examen professionnel et celui de J.-M. Nocquet, en disponibilité pour une année de travail post-doctoral à l'Université d'Oxford (Royaume-Uni).

Points importants de 2002

Parmi les points majeurs, on notera la conclusion des travaux de thèse de J.-M. Nocquet, qui, grâce à un traitement très poussé des observations GPS disponibles en Europe (stations permanentes et opérations géodynamiques régionales ponctuelles réitérées) et grâce à son excellente maîtrise des problèmes liés aux systèmes de référence, a réussi à extraire de nombreuses informations sur la géodynamique de la plaque Européenne.

Par ailleurs, les travaux menés par K. Le Bail avec l'Université de Berne pour le traitement de l'observable DORIS sont également des éléments importants. Et, comme en 2001 et quoique ces travaux se soient largement déroulés à l'Observatoire de la Côte d'Azur, les succès de la station laser ultra mobile dans sa mission de calibration de Topex-Poséïdon et de Jason rejaillissent sur l'IGN et le laboratoire LAREG.

Enfin, 2002 a été l'année de conclusion du GdR AGRET, qui a largement montré l'importance d'une animation régulière des groupes de géodésiens français. L'année a été donc marquée par de nombreux travaux préparatoires pour la constitution d'un nouveau programme, provisoirement appelé GdR G2 et qui se concrétisera au début 2003, consacrant l'existence de nombreux observatoires géodésiques et structurant les financements requis pour les faire fonctionner.

Publications du laboratoire LAREG

La liste des publications du laboratoire se trouvent en fin de Bulletin, au chapitre C.

B. Quelques actions marquantes

B.1 Prototype de logiciel pour la réalisation d'une Base de Données Bâti 3-D

Grégoire Maillet & David Flamanc

Introduction

La reconstruction automatique des bâtiments à partir des images aériennes est, depuis quelques années, l'un des axes de recherche majeurs du laboratoire MATIS [FUCHS et al 02]. Afin de capitaliser toute cette expérience et de faire un bilan précis de ce qu'il est aujourd'hui possible de réaliser dans un contexte de production, un prototype de logiciel pour la réalisation d'une Base de Données (BD) Bâti 3-D a été développé.

Ce prototype s'appuie notamment sur les travaux suivants :

- la corrélation automatique : [BALLARD 97], [PAPARODITIS et al 00] et [MAILLET et al 02] ;
- la reconstruction de bâti à l'aide d'une grammaire de modèles : [FUCHS 01] ;
- la reconstruction de bâti en utilisant la connaissance des emprises cadastrales : [JIBRINI 02] ;
- la production d'ortho-images avec bâtiments redressés : [BOLDO 02] ;
- l'extraction de primitives en multi-vues : [TAILLANDIER 02].

Cette maquette logicielle est, d'une part, une façon de faire le bilan de l'état actuel de nos travaux pour mieux planifier nos axes de recherches, et, d'autre part, un pas vers les utilisateurs. Dans beaucoup de thèses, on trouve en conclusion le pourcentage de bâtiments que l'on est capable de traiter, mais les premières questions que posent les utilisateurs potentiels sont :

- combien de temps faut-il pour détecter les fautes ?
- combien de temps faut-il pour traiter ces fautes manuellement ou avec une autre méthode automatique ?
- comment pourriez-vous améliorer les performances de cette approche automatique en introduisant la possibilité d'interactions avec un opérateur ?

Notre prototype permettra, à terme, de répondre à ces questions puisqu'en plus des méthodes entièrement automatiques, des outils interactifs et manuels ont été ajoutés pour être capable de traiter de façon efficace et exhaustive de larges zones.

Enfin, cette maquette, en tant que prototype, peut aider à l'amélioration des chaînes de production actuelles, et doit permettre d'anticiper ce qu'il sera possible de produire dans un avenir proche. S'il est aujourd'hui acquis qu'il existe de nombreuses applications pour des bases de données urbaines 3-D à grande échelle, en revanche, le débat sur la forme et le contenu de ces bases de données est encore largement ouvert. En proposant un outil opérationnel permettant de produire ces données, nous espérons faire progresser ces débats.

Approche choisie

Données utilisées

- ce prototype-logiciel est conçu pour gérer aussi bien des images analogiques que des images provenant de la caméra numérique de l'IGN. Dans tous les cas, le multi-recouvrement est exploité au maximum par les algorithmes de reconstruction 3-D ;
- lorsque l'on dispose des plans cadastraux sous la forme d'une couche vecteur 2-D, on peut introduire dans le logiciel les emprises des bâtiments. Ces emprises cadastrales permettent de focaliser certains traitements. Notons que lorsque l'utilisateur ne dispose pas de ces plans cadastraux, il peut définir lui-même des zones de focalisation, *via* des modes d'interaction adaptés à chaque algorithme de reconstruction. Cette prise en compte de l'information cadastrale pour la réalisation de BD Bâti s'articule bien avec la coopération récente entre l'IGN et la DGI ;

- concernant le format et le contenu exact des données produites, le prototype est resté très ouvert. Pour le moment nous avons travaillé surtout sur la géométrie des bâtiments, en nous préoccupant peu de la sémantique ou des relations topologiques entre objets. Nos outils sont surtout adaptés à la reconstruction précise des pans de toits, mais sans la prise en compte des petites structures comme les lucarnes ou les cheminées (difficilement envisageable en automatique sur des images à 20 ou 30 cm de pixel-sol). De même, nous ne nous sommes pas intéressés au mobilier urbain, ou à la végétation, mais nous restons à l'écoute des besoins, et ce prototype est conçu pour pouvoir évoluer.

Description générale de la chaîne de traitements

La chaîne des traitements utilisant ce logiciel se découpe comme suit.

Préparation du chantier

Tout d'abord, les données en entrée sont importées dans le chantier. Il s'agit des images aérotriangulées et de la base de données planimétriques des emprises de bâtiments si elle est disponible. On peut aussi importer dans le logiciel des données vecteurs, ainsi que des Modèles Numériques de Surface déjà existants (laser ou corrélation). Le logiciel est prévu pour gérer de gros volumes de données.

Ensuite, l'utilisateur lance le calcul des données intermédiaires que peuvent être les Modèles Numériques d'Élévations ou les ortho-images (voir le chapitre suivant).

Traitement automatique avec filtrage

Dans le cas où l'on dispose d'une base de données cadastrales, l'utilisateur peut lancer des algorithmes de reconstruction entièrement automatiques. Pour chaque parcelle un processus autonome (batch) est lancé. Notons que ces traitements ne bloquent pas l'interface du logiciel. Ils sont exécutés comme des tâches de fond pendant que l'opérateur continue à travailler. Le logiciel peut alors être vu comme une « rampe de lancement » d'algorithmes et comme un tableau de bord permettant le suivi de ces différents traitements. L'opérateur peut suivre l'état d'avancement de ces traitements, les interrompre, les suspendre, les enchaîner ... Il est aussi alerté en cas d'échec. Dans ce dernier cas, des interactions sont prévues pour contrôler rapidement les données produites : visuellement et à l'aide des scores fournis par les traitements (voir figure B.1.1, page suivante).

Reprise et complètement avec interactions

Une fois les traitements automatiques terminés, l'opérateur peut facilement visualiser les zones qui restent à traiter. Il peut alors décider de les traiter avec un autre algorithme, d'affiner la focalisation, ou d'utiliser des outils plus interactifs si le bâtiment est trop complexe pour être reconstruit automatiquement.

Reprise et complètement en mode manuel

Finalement, il est inévitable d'avoir des bâtiments trop complexes pour être traités avec des outils automatisés ou assistés. L'opérateur peut alors restituer manuellement ces objets en stéréoscopie. D'une manière plus générale, ces interactions manuelles permettent aussi d'affiner la restitution. L'opérateur peut, par exemple, ajouter quelques détails sur les toits reconstruits automatiquement.

Préparation des données intermédiaires

Modèles Numériques d'Élévations (MNE) denses

Même si ce n'est pas obligatoire, la mise en place d'un chantier commence souvent par le calcul d'un MNE sur la zone (figure B.1.2, page suivante).

Un Modèle Numérique d'Élévations, même assez grossier, donne une bonne connaissance de la zone à traiter. Il permet par exemple de pouvoir estimer finement les zones vues par chaque image. Il peut aussi être utilisé pour passer des coordonnées images aux coordonnées terrain. C'est aussi une donnée de base pour beaucoup d'algorithmes automatiques. Il peut aussi servir à calculer des ortho-images avec bâtiments redressés.

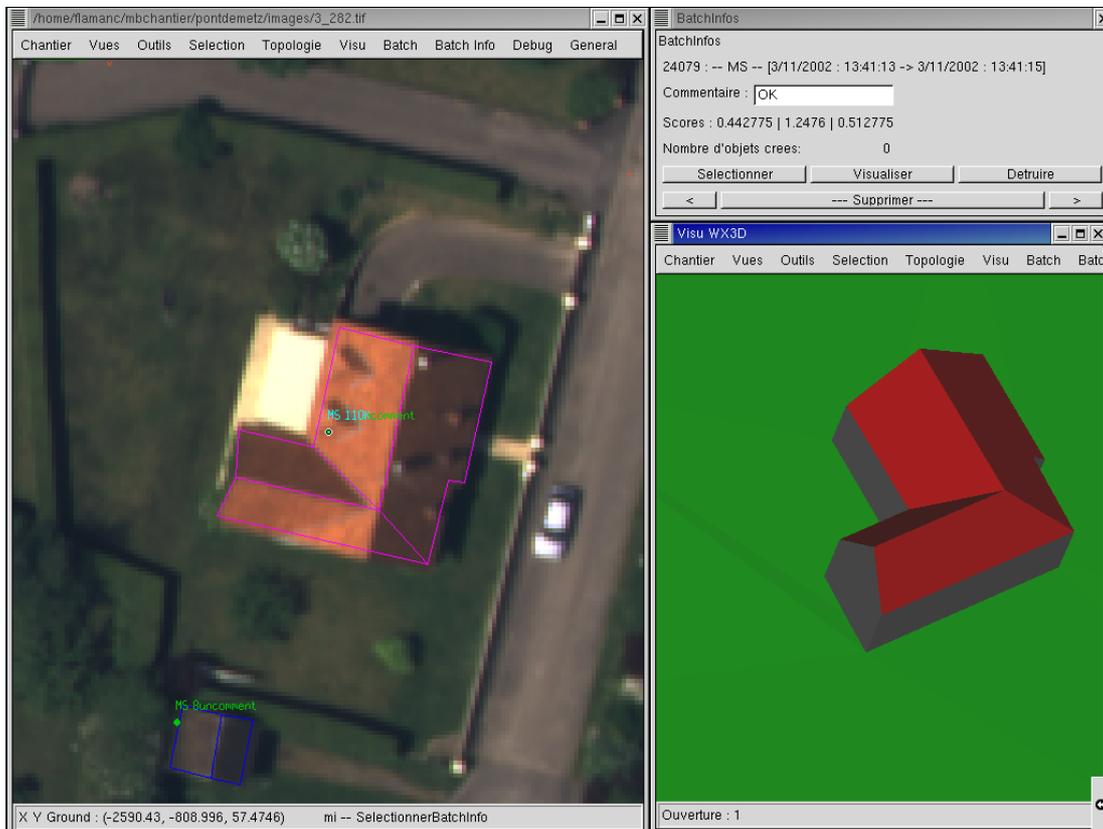


figure-B.1.1

Exemple de contrôle des traitements avec l'injection dans une image à gauche, une visualisation vecteur en 3-D, en bas et une fenêtre de suivi renseignant les meta-données du traitement, en haut.

Le calcul de ces MNE denses est maintenant un processus bien maîtrisé par le laboratoire MATIS. Depuis les travaux de Caroline Baillard et Olivier Dissard [BAILLARD 97], ces traitements n'ont cessé d'être optimisés et améliorés. Il est maintenant possible de lancer des calculs de MNE avec des paramétrages automatiques sur de très grandes zones sans avoir besoin « d'interaction opérateur ». Donc, même si ces traitements restent longs (environ 200 hectares par heure pour un MNE au pas de 70 cm sur une prise de vue numérique de production avec une machine à 1 GHz), ils sont assez peu coûteux puisqu'ils ne consomment pas de « temps opérateur ».

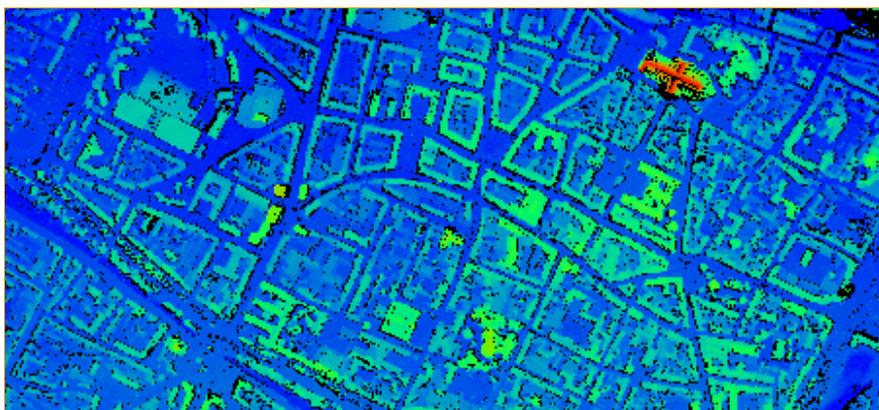


figure B.1.2 : exemple de MNE calculé sur le centre ville d'Amiens

Modèles Numériques d'Élévations fins, focalisés sur les parcelles cadastrales

Le laboratoire MATIS dispose également de traitements plus récents pour le calcul de MNE fins (voir figure B.1.3, page suivante). Ces traitements permettent notamment de tirer au mieux parti des recouvrements multiples [PAPARODITIS 00], [MAILLET 02].

Ils sont basés sur des optimisations bidirectionnelles [ROY et al 98], [ZAHZAM et al 02] sur l'ensemble des scores de corrélation multi-vues calculés dans un volume englobant le bâtiment. Mais ces traitements sont lourds, et ne sont réellement utiles que pour les algorithmes de reconstruction fine des bâtiments. C'est pourquoi, il est intéressant, lorsque l'on dispose de données cadastrales de ne les calculer que sur les zones bâties.

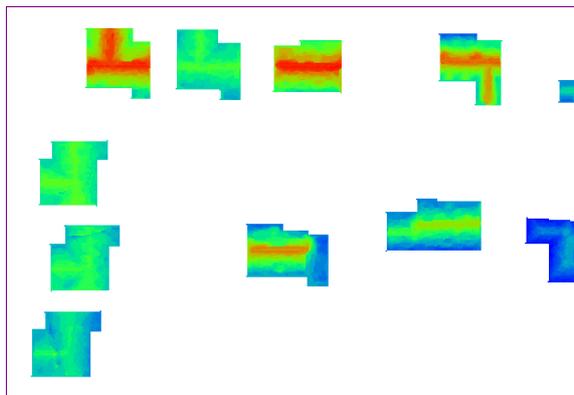


figure B.1.3 : exemple de MNE fins calculés sur une zone pavillonnaire d'Amiens

Ortho-images

Les ortho-images redressées [BOLDO 02] sont des vues très pratiques pour les contrôles ou les saisies en planimétrie. Lorsque l'on utilise des données cadastrales, ces ortho-images permettent rapidement d'identifier les parcelles incohérentes, et peuvent même être utilisées pour corriger, ou compléter ces données. Sur la figure B.1.4, nous pouvons constater que la plupart des parcelles cadastrales se superposent bien à l'ortho-image. On peut aussi noter que plusieurs parcelles bâties (sur la droite de l'image) comportent des portions de sol. Ce type de problème semble assez fréquent en milieu urbain dense, et perturbe les algorithmes de reconstruction automatique. Par exemple, l'algorithme de reconstruction issu des travaux de thèse d'Hassan Jibrini, n'a pas été écrit pour traiter les parcelles comportant des discontinuités verticales.

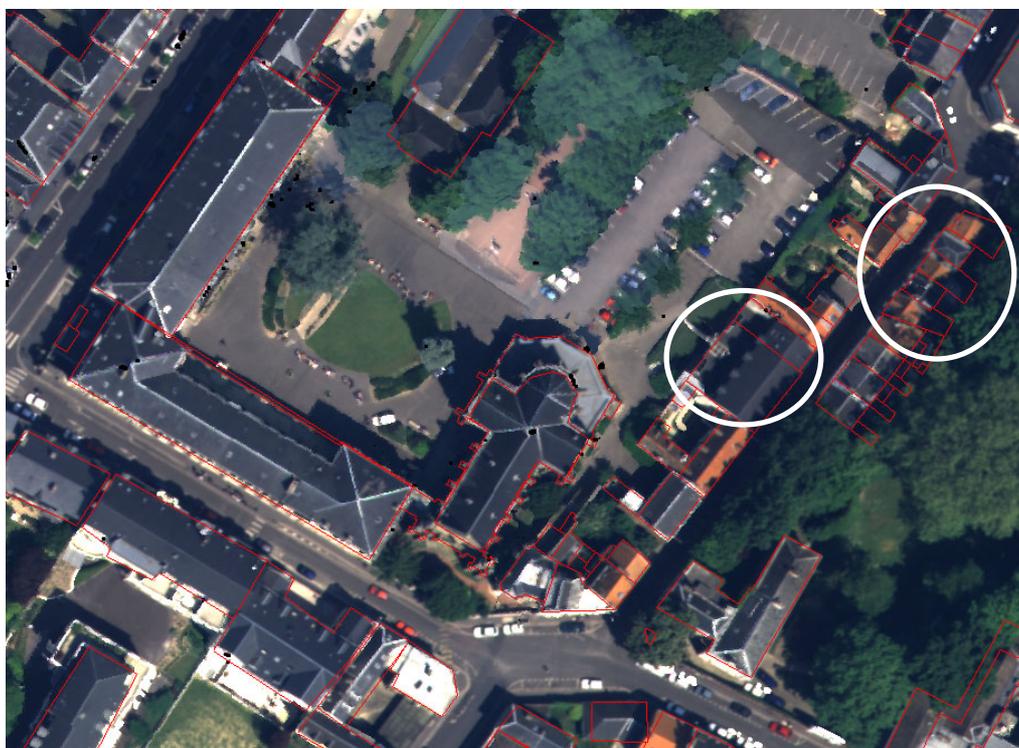


figure B.1.4

Exemple d'ortho-image avec bâtiments redressés, avec une superposition des données cadastrales vecteur (en rouge). Les zones cerclées en blanc correspondent aux parcelles cadastrales qui incluent des zones de sol.

Traitements automatiques avec l'aide du cadastre

Reconstructions complexes

Dans cette approche [JIBRINI 02], les emprises cadastrales servent, non seulement pour la focalisation, mais aussi pour guider la recherche des pans de toit. En effet, l'algorithme part de l'hypothèse que les directions des bords du bâtiment sont des directions privilégiées pour la recherche des portions de plans qui le composent. La recherche de ces plans est faite à l'aide d'une transformée de Hough sur un cube de corrélation calculé à la volée, ou sur un MNE fin préalablement calculé (cf. chapitre précédent). Il y a ensuite un processus d'optimisation pour combiner au mieux toutes les portions de plans détectées afin de reconstruire un toit cohérent.

Cette approche donne de bons résultats sur de larges zones (voir figure B.1.5), mais, pour le moment, elle est assez peu robuste aux incohérences du cadastre : le processus ne sait pas traiter les discontinuités altimétriques qui apparaissent lorsqu'une portion de sol est présente dans la parcelle de bâtiment (voir figure B.1.4). Dans le prolongement de cette thèse, une étude est actuellement menée par Hassan Jibrini à l'ENST, en partenariat avec le laboratoire MATIS. Cette étude a notamment pour objectif de mieux gérer ces problèmes de discontinuités altimétriques. Notre maquette logicielle est utilisée comme environnement de travail pour cette étude.

Reconstructions simples

La méthode précédente fournit de bons résultats mais sa complexité ne semble pas vraiment justifiée dans le cas de bâtiments assez simples comme, par exemple, ceux que l'on trouve dans les zones pavillonnaires. Nous avons donc cherché une méthode à la fois plus simple, et plus contrainte pour traiter ces zones. En effet, en limitant les possibilités des modèles reconstruits, on obtient des formes mieux généralisées.

Le principe de l'algorithme est basé sur la recherche d'un squelette valide à partir de la forme de l'emprise cadastrale. Un squelette est défini comme valide, s'il permet de découper l'emprise du bâtiment en deux zones symétriques comme le montre la figure B.1.6, page suivante. Sur cette figure, un bâtiment à huit côtés permet de générer deux squelettes valides. Puis, à partir de chaque squelette valide, on dérive des modèles avec trois types d'extrémités possibles : plate, à deux pans ou en V. Cet exemple montre comment cette approche basée sur des règles simples permet de traiter un grand nombre de cas. Chaque modèle est ensuite plaqué sur un MNE fin, et on choisit le modèle qui décrit le mieux ce MNE.

Bien entendu, sur certains bâtiments, la présence de petits décrochements le long de l'emprise cadastrale bloque cette recherche d'axe de symétrie. Nous avons donc ajouté un mécanisme de généralisation qui permet de ne pas tenir compte de ces micro-structures lors de la recherche de modèles puis de les réintégrer pour la reconstruction. Sur la figure B.1.7, page 21, on voit un exemple extrême de ce mécanisme de généralisation.

Cette méthode s'avère très efficace sur les zones pavillonnaires péri-urbaines (voir figure B.1.8, page 21). Elle est rapide et robuste. Les modèles proposés sont d'une part, plus spécifiques que les reconstructions issues de l'approche précédente (un modèle contraint donne des résultats plus réguliers), et d'autre part, plus génériques que les modèles « figés » des approches semi-automatiques du chapitre suivant.

Traitements semi-automatiques

Reconstruction avec focalisation manuelle et par ajustement de modèles simples

Dans cette approche, l'opérateur assure un double rôle : il focalise le traitement et il identifie le modèle à utiliser. Des tests ont été effectués avec des modèles bi-pan simples. L'interaction consiste à saisir en mono-scopie la diagonale des toits dans l'espace image. La reconstruction du modèle s'appuie sur des estimations robustes de plans ou de paraboloïdes inversés à partir du MNE.

Cet outil fonctionne et peut donner de bons résultats, mais le gain de productivité est assez faible. De plus, pour être capable de traiter des zones significatives avec ce type d'approche, il faut développer des outils spécifiques pour un grand nombre de modèles. Cette stratégie atteint rapidement ses limites, et nous ne l'avons pas poursuivie. Elle peut néanmoins être rentable sur des paysages simples et pour des applications où l'on autorise de fortes généralisations.

Reconstruction avec focalisation mais sans sélection manuelle du modèle

Dans ce cas, ce n'est pas l'opérateur qui choisit le type précis de modèle à utiliser. L'opérateur assure simplement la focalisation et l'algorithme choisit un modèle dans une bibliothèque.

Pour cette méthode, nous avons utilisé les travaux de thèse de Frank Fuchs [FUCHS 01]. Les modèles sont décrits par des graphes relationnels entre des primitives simples (bord de toit, plan, ligne de faîte). Une fois le modèle reconnu, il est instancié sur l'ensemble des primitives observées.

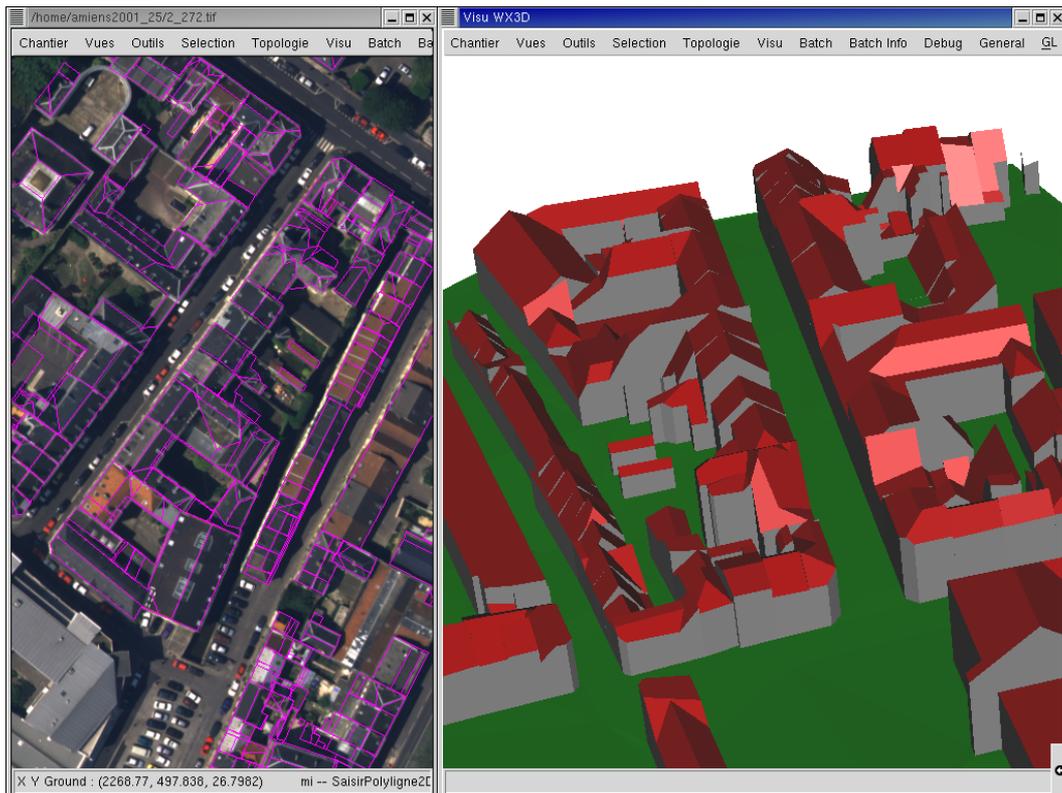


figure B.1.5

Exemple d'un quartier de la ville d'Amiens, reconstruit automatiquement (algorithme d'Hassan Jibrini) à partir des emprises cadastrales de bâtiment.

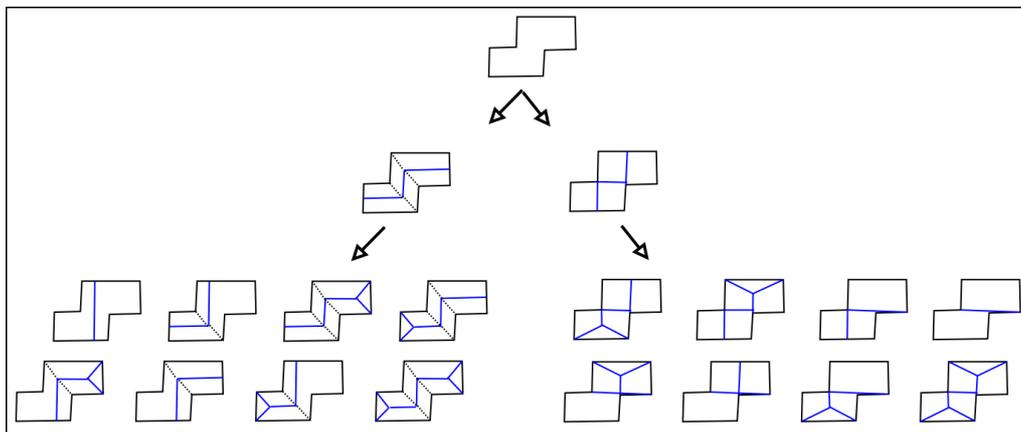


figure B.1.6

Exemple de génération de modèles : ce bâtiment à huit côtés permet de générer deux squelettes valides générant à leur tour dix-huit variantes de modèles.

Même si nous avons conservé la stratégie générale de l'approche développée par Frank Fuchs, il y a eu des adaptations notables lors de l'intégration de ses travaux dans notre prototype. Dans sa thèse, la méthode est entièrement automatique, avec une focalisation sur les zones de sursol extraites à partir d'un MNE. Pour améliorer les résultats, nous avons préféré utiliser une focalisation manuelle. De même, le contexte de la thèse avait été volontairement limité à de la stéréoscopie simple alors que nous avons cherché à tirer parti de la multi-stéréoscopie pour l'extraction des primitives. De plus, nous avons limité la taille de la bibliothèque des modèles pour accélérer les temps de traitement.

Finalement, cette approche donne des résultats assez prometteurs, mais elle reste lourde, et comme elle ne fonctionne que sur des modèles assez simples nous la jugeons peu rentable pour le moment. Par contre, de nouveaux travaux sur la reconstruction automatique des bâtiments en utilisant la multi-stéréoscopie, actuellement en cours au laboratoire MATIS [TAILLANDIER 02], devraient produire de meilleurs résultats. Outre l'utilisation de la multi-stéréoscopie, ces travaux utilisent une modélisation beaucoup plus générique des bâtiments, proche de celle choisie par Hassan Jibrini (voir le paragraphe « Reconstructions complexes » du chapitre précédent).

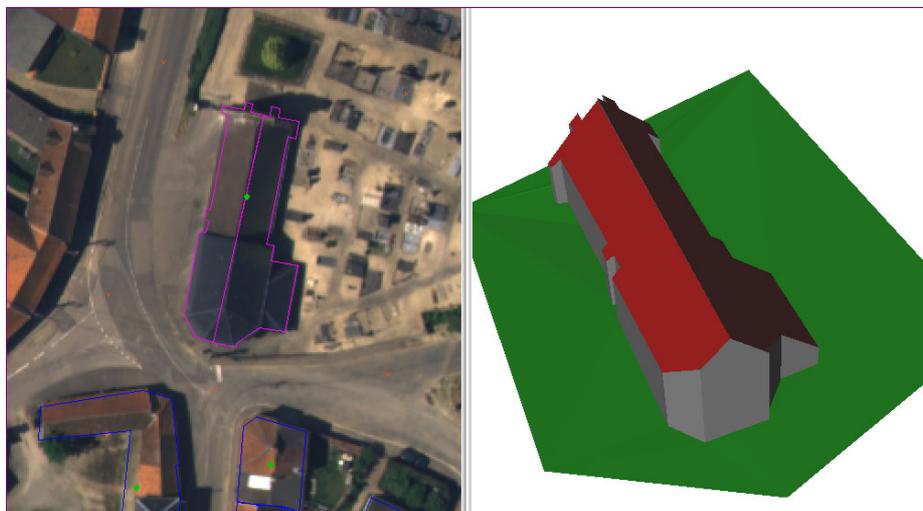


figure B.1.7

Exemple de généralisation automatique permettant de traiter des bâtiments qui ne sont pas rigoureusement symétriques par rapport à leur squelette.

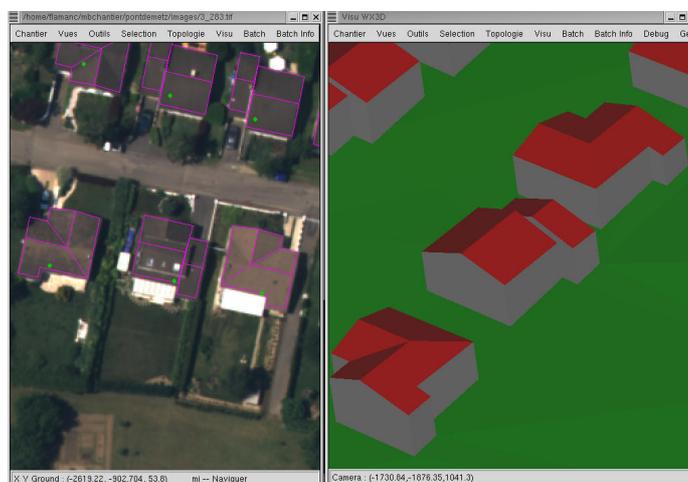


figure B.1.8

Exemples de bâtiments pavillonnaires reconstruits automatiquement à partir de leur emprise cadastrale. On peut remarquer que les trois bâtiments, au centre de cette image, ne peuvent être parfaitement décrits par nos modèles, mais que la méthode en propose une généralisation acceptable.

Reconstruction assistée de modèles symétriques

Cet outil permet de reconstruire des bâtiments sous la forme de modèles bi-pan symétriques à partir de la saisie du faite de toit. Les attaques en V, les attaques droites et les « virages » sont gérés. À partir du squelette du faite de toit, on calcule un ensemble de modèles bi-pan symétriques possibles. Pour chaque modèle, on associe un score résultant des valeurs des gradients le long de la projection du modèle dans l'espace image. On propose le modèle possédant le meilleur score. Si l'utilisateur n'est pas satisfait, il peut se déplacer dans l'espace des modèles jusqu'à obtenir un modèle correct (voir figure B.1.9).

Ce type d'algorithme est très lié aux caractéristiques architecturales de la zone. Par exemple, il est très efficace et traite la majorité des bi-pans sur le centre-ville d'Amiens. D'autres méthodes similaires peuvent sans doute être développées suivant les différents types de paysage à traiter. En effet, à partir des caractéristiques architecturales d'une ville, on peut la plupart du temps définir une famille de modèles décrivant bien le paysage.

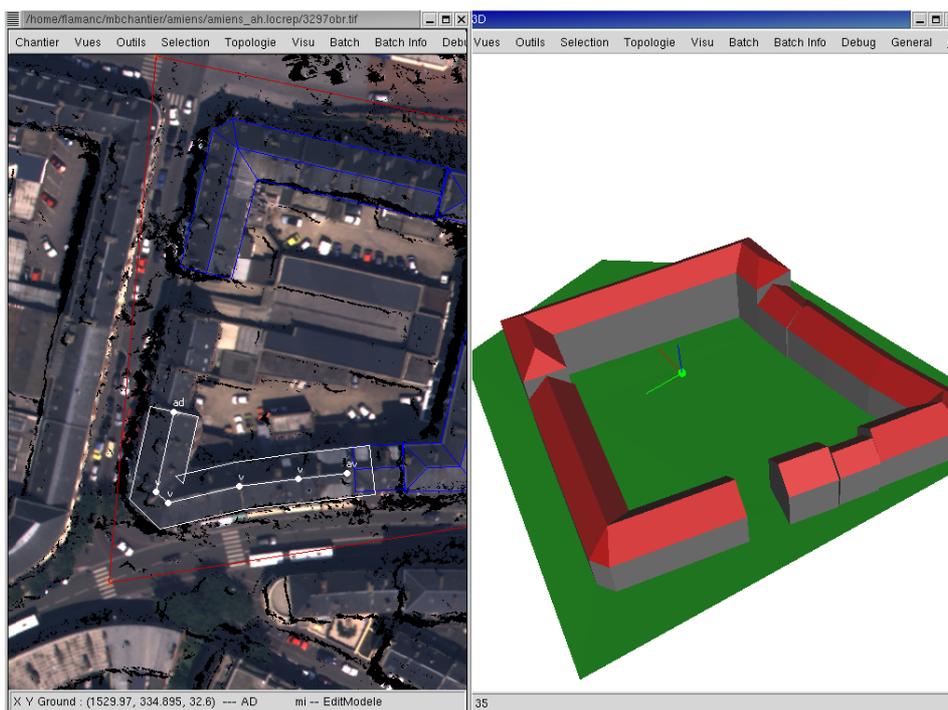


figure B.1.9

Exemple d'un groupe de bâtiments reconstruit avec l'outil interactif de saisie de bâtiment symétrique. À gauche, on voit les six points du faite (en blanc) qui ont été saisis pour restituer l'un des bâtiments.

Traitements manuels

L'objectif de cette maquette logicielle n'est pas de proposer un nouvel outil de saisie manuel. Il en existe déjà de très complets et performants. Cependant un petit module de saisie stéréoscopique a été développé afin d'être capable de traiter tous les bâtiments.

Exemples de résultats

Sur les figures B.1.10 et B.1.11 (page suivante), on peut voir que ce prototype logiciel permet déjà de traiter entièrement des zones de centre ville, ou des zones pavillonnaires. Pour le moment, il est encore difficile d'estimer les temps nécessaires pour ces saisies car ce prototype n'a pas encore été testé par un opérateur professionnel. Après une première phase exploratoire, nous sommes en train de simplifier et d'améliorer les interfaces pour préparer les premiers tests.

Perspectives et conclusions

Actuellement ce prototype permet donc de traiter efficacement et de manière exhaustive de larges zones urbaines. Son ergonomie est en train d'être améliorée avant de débiter les premiers tests réalisés par un opérateur. C'est à l'issue de ces tests que les temps et donc les coûts de ces saisies 3-D pourront être évalués.

Ce socle logiciel va aussi être utilisé par l'un des service de production de l'IGN (SBV : Service des bases de données vecteur). Ce sera une version limitée qui servira à calculer un MNE sur l'ensemble de la communauté urbaine de Bordeaux (550 km²). On peut aussi noter que ce prototype a également fait ses preuves en tant qu'environnement de travail et d'intégration pour la recherche dans le cadre de l'étude menée par Hassan Jibrini à l'ENST. Il est également utilisé comme plate-forme de tests pour les ortho-images avec bâtiments redressés.

Enfin, des extensions pour la photogrammétrie terrestre vont être ajoutées dans le cadre de la nouvelle action de recherche du laboratoire MATIS : « *Photogrammétrie architecturale* ».

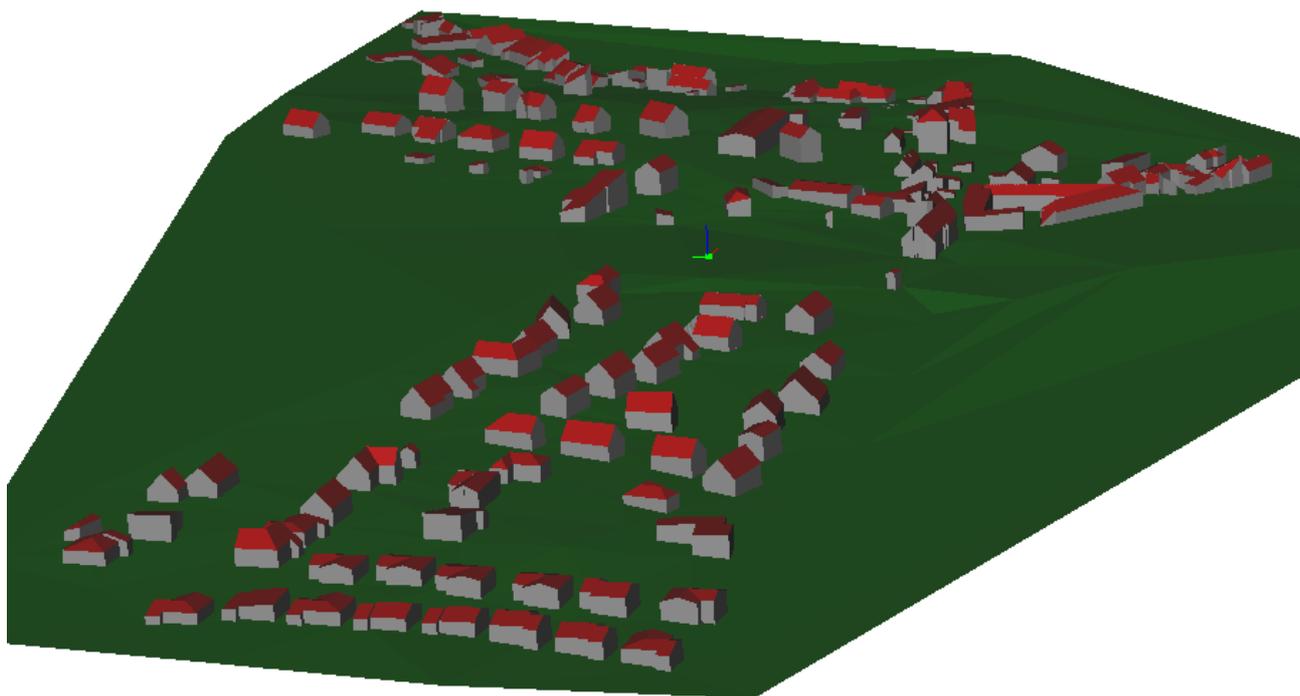


figure B.1.10 : exemple de données produites en zone pavillonnaire

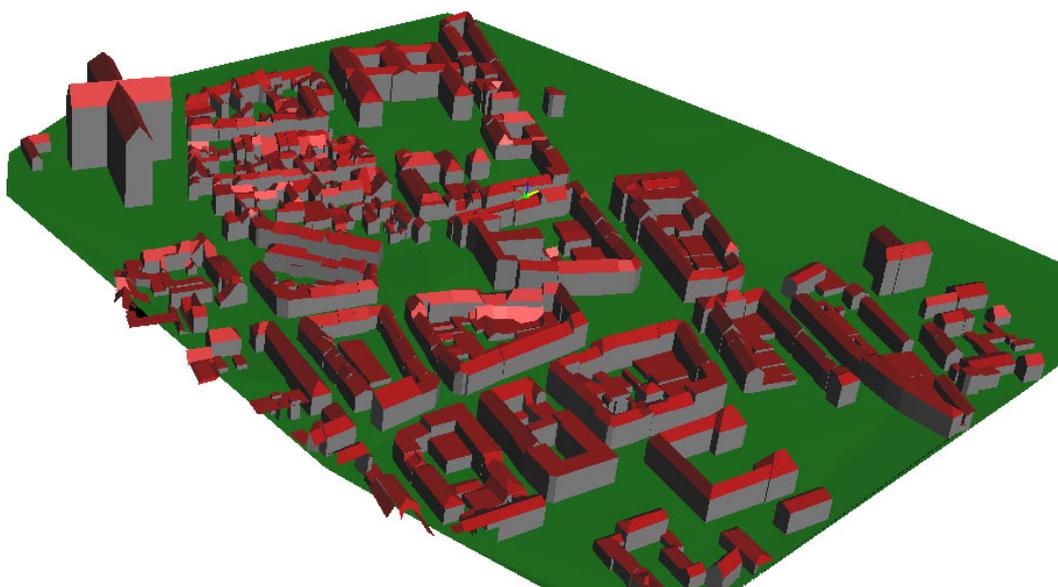


figure B.1.11 : exemple de données produites en centre ville

Références

- [ROY, COX 98] S. Roy and I. Cox : *A maximum-flow formulation of the n-camera correspondence problem*, ICCV, 1998.
[ZAHZAM, LE BESNERAIS 02] S. Zahzam & G. Le Besnerais : *Étude d'algorithmes d'optimisation combinatoire appliquée au traitement d'images*, rapport technique de l'ONERA, RT 1/06765 DTI, mars 2002.

Publications

[BAILLARD 97] C. Baillard : *Analyse d'images aériennes stéréoscopiques pour la restitution 3-D des milieux urbains. Détection et caractérisation du sursol*, thèse de doctorat, ENST, laboratoire MATIS, IGN-SR-97-005-C-THE-CB, soutenue le 10 octobre 1997.

[BOLDO 02] D. Boldo : *Fabrication conjointe de MNS et d'ortho-images pour la visualisation perspective de scènes urbaines*, thèse de doctorat de l'Université René Descartes, Paris-5, laboratoire MATIS, IGN-SR-02-003-C-THE-DB, soutenue le 14 juin 2002.

[FUCHS 01] F. Fuchs : *Contribution à la reconstruction du bâti en milieu urbain, à partir d'images aériennes à grande échelle. Étude d'une approche structurelle*, thèse de doctorat de l'Université René Descartes, Paris-5, laboratoire MATIS, IGN-SR-01-001-C-THE-FF, soutenue le 27 avril 2001.

[FUCHS et al 02] F. Fuchs, H. Jibrini, G. Mailet, N. Paparoditis, M. Pierrot Deseilligny & F. Taillandier : *Trois approches pour la reconstruction automatique de modèles 2-D de bâtiments en imagerie aérienne haute résolution*, in Bulletin SFPT n°166, pp.10-18, laboratoire MATIS, IGN-SR-02-011-C-ART-FF, 2002.

[JIBRINI 02] H. Jibrini : *Reconstruction automatique des bâtiments en modèles polyédriques 3-D à partir de données cadastrales vectorisées 2-D et d'un couple d'images aériennes à haute résolution*, thèse de doctorat, ENST, laboratoire MATIS, IGN-SR-02-005-C-THE-HJ, soutenue le 29 avril 2002.

[MAILLET et al 02] G. Mailet, N. Paparoditis and F. Taillandier : *TIN surface reconstruction from multiple calibrated aerial images in urban areas*, ICIP'02, Rochester (NY), laboratoire MATIS, IGN-SR-97-012-C-COM-GM, septembre 2002.

[PAPARODITIS et al 00] N. Paparoditis, I. Baghli & C. Thom : *Reconstruction de Modèle Numérique de Surface en zone urbaine à partir de prises de vues aériennes numériques à fort recouvrement*, in Bulletin d'information de l'IGN n° 71, pp. 27-32, laboratoire MATIS, IGN-SR-00-023-C-ART-NP, 2000.

[TAILLANDIER, DERICHE 02] F. Taillandier & R. Deriche : *Reconstruction de primitives linéaires 3-D multi-vues pour la modélisation de scènes urbaines*, RFIA'02, pp. 115-124, laboratoire MATIS, IGN-SR-02-002-C-COM-FT, 2002.

B.2 Fabrication de vraies ortho-images et correction des ombres

Didier Boldo

Introduction

Cet article est consacré à une méthode permettant de fabriquer automatiquement de vraies ortho-images (avec bâtiments redressés). Cette méthode s'appuie sur une amélioration des Modèles Numériques de Surface (MNS) obtenus par corrélation. En effet, ceux-ci ont des limites de bâtiments relativement imprécises et leur utilisation directe pour les vraies ortho-images est impossible. Les ortho-images, calculées à partir de chaque image d'origine, sont ensuite fusionnées pour obtenir l'ortho-image finale. Afin d'améliorer la lisibilité du résultat, un modèle radiométrique adapté aux zones urbaines est utilisé pour la correction des ombres.

Contexte et données

Ortho-image : définition

Une ortho-image est une image, aérienne ou satellitaire, superposable à une carte. Chaque pixel est ainsi localisé par des coordonnées géographiques. Une ortho-image est donc une image déformée de telle manière que le centre de prise de vue soit à la verticale de chaque point : cette image est en perspective axonométrique verticale. Dans les ortho-images classiques (voir un exemple figure B.2.1, page suivante), les défauts corrigés sont : la distorsion de l'objectif, la non verticalité de l'axe de prise de vue, la rotondité de la terre et le relief du sol naturel.

Les objets situés en sursol (bâtiments, ponts, forêts ...) ne sont pas corrigés et leurs positions et leurs tailles ne sont pas exactes. En outre, le dévers des bâtiments subsiste : les bâtiments apparaissent « couchés » sur les ortho-images (comme la cathédrale sur la figure B.2.1) et ils cachent alors une partie du sol. Ce problème est particulièrement sensible en milieu urbain dense, car les immeubles masquent les fonds de rue qui sont donc rarement complètement visibles.

Les « vraies ortho-images » sont des ortho-images où tous les défauts, y compris les dévers, ont été corrigés. Tous les objets, bâtiments compris, sont donc à leur position cartographique. Pour calculer ces vraies ortho-images, il est nécessaire de disposer de modèles de la surface topographique, appelés Modèles Numériques de Surface (MNS). Pour nos applications, ces MNS sont des grilles régulières d'altitude, avec un pas très fin, de l'ordre de quelques dizaines de centimètres. L'ortho-image calculée sera au même pas que le MNS.

Contexte

Notre objectif est de générer automatiquement de vraies ortho-images à partir d'un ensemble d'images aériennes numériques en recouvrement. La plupart des travaux sur les ortho-images portent sur l'automatisation de la production d'ortho-images classiques, voir [KNABENSCHUH 95] ou [LE MEN, BOLDO 00].

L'intérêt suscité par les vraies ortho-images semble très important, voir [TRIGLAV 00], notamment pour des applications de type aménagement urbain ou réalité virtuelle. Pour leur fabrication, la plupart des auteurs utilisent des données Laser, [DEQUAL et al 01] ou, plus généralement, des données issues de restitution manuelle, voir [RAU, CHEN 00]. Ces deux types de données sont de grande précision mais très onéreux à produire.

Le calcul de vraies ortho-images nécessite en effet des Modèles Numériques de Surface très précis afin de bien localiser les occultations. Les défauts des MNS de corrélation génèrent des artefacts très gênants visuellement, car ils brisent les formes qui nous permettent de comprendre la scène, telles que les limites de toits, et introduisent de nouvelles limites qui ne correspondent à rien de réel.

Du fait des parties cachées, chaque ortho-image individuelle calculée à partir d'une image particulière possède des occultations. Il est donc nécessaire d'utiliser toutes les ortho-images simultanément afin de générer l'ortho-image finale. Notre but est donc d'obtenir une ortho-image finale lisible, et contenant de l'information sur l'ensemble de la scène.

Données

Ce paragraphe décrit brièvement les données que nous utilisons.

Images

Nous utilisons des images issues des travaux du Laboratoire OEMI de l'IGN [THOM, SOUCHON 99]. Ce sont des images aériennes numériques à haute résolution en niveaux de gris, de très bonne qualité radiométrique. Grâce à elles, les problèmes de différence d'aspect entre photos liés au développement des clichés et au scannage (problèmes quasiment impossibles à modéliser et à corriger) ne se posent plus.

Du point de vue radiométrique, seuls restent les problèmes liés à la physique de la prise de vue tels que vignettage, hot-spot. Les techniques éprouvées de photogrammétrie (aérotriangulation, calibration rigide) permettent de positionner très précisément ces images par rapport aux repères cartographiques classiques. La géométrie des images est donc très bien connue, avec une précision de l'ordre de $1/3$ à $1/2$ pixel.

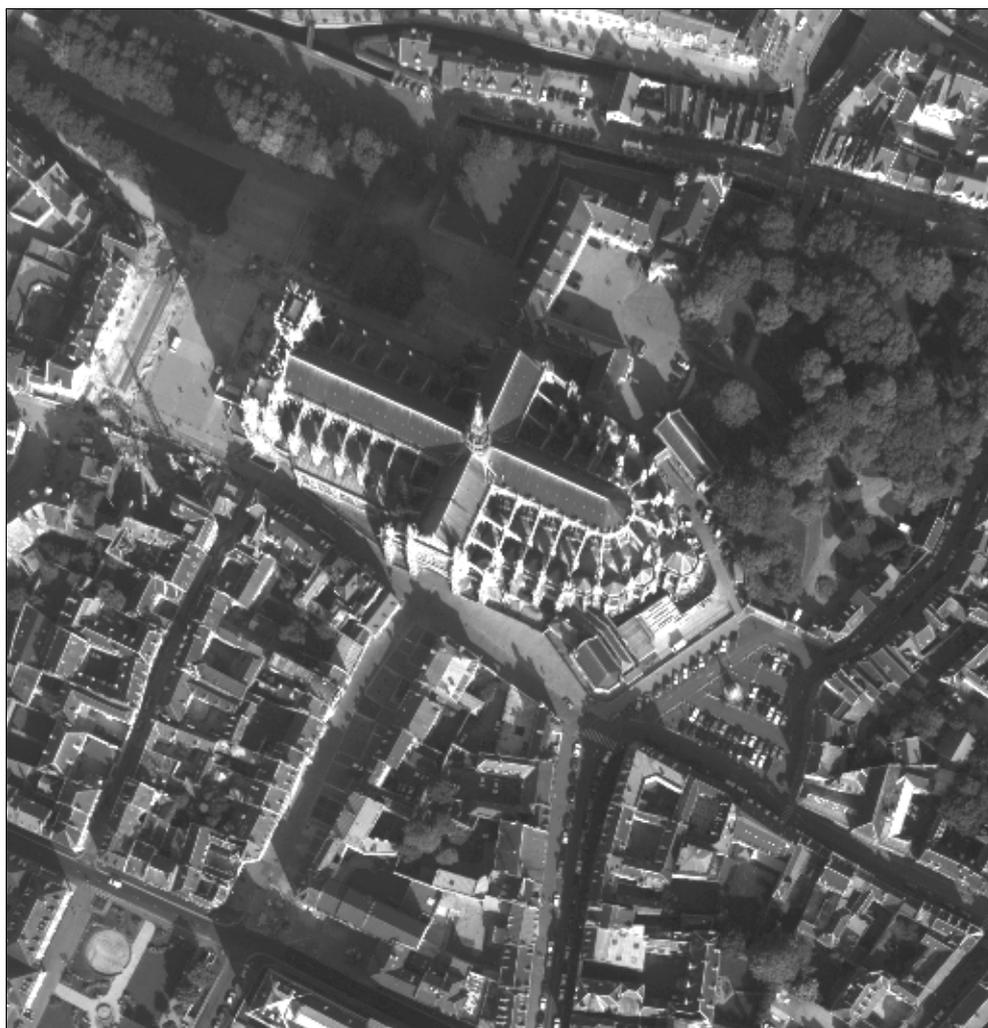


figure B.2.1 : ortho-image classique

Pour nos applications, nous nous trouvons en environnement urbain dense (voir un extrait d'image figure B.2.2, page suivante). Les images sont à grande résolution : le pixel-sol a une taille de l'ordre de 20 cm. Afin de minimiser les parties cachées, et donc de tenter d'avoir au moins un point de vue pour chaque point terrain, les recouvrements entre clichés sont importants.

Dans les configurations étudiées, le recouvrement est de 60% entre les bandes et au sein des bandes. Chaque point du terrain est donc vu sur au moins quatre images et peut apparaître sur neuf images, à moins d'être masqué par des objets plus hauts. Cette configuration semble nécessaire pour garantir que chaque point du sol est visible sur au moins une des images aériennes.

Modèle Numérique de Surface

Même s'ils restent relativement onéreux à produire actuellement, la disponibilité de MNS sur les grandes agglomérations d'ici quelques années ne fait guère de doute. Que ce soit par corrélation automatique, voir [BAILLARD 97] ou [PAPARODITIS et al 00] ou par lasers aéroportés [AXELSSON 99], les techniques actuelles permettent d'obtenir des résultats denses et de bonne précision. Des entreprises ont d'ailleurs commencé la production industrielle de MNS.



figure B.2.2 : extrait d'image numérique sur Amiens

Les caractéristiques de la description de la surface nécessaires pour obtenir des vraies ortho-images de bonne qualité sont :

- précision de l'altitude des bâtiments : pour que l'ortho-image soit précise ;
- non-continuité de la surface (façades verticales) : pour que les occultations apparaissent clairement ;
- précision de localisation des discontinuités : pour que les occultations apparaissent au bon endroit.

Nous souhaitons n'utiliser que les données issues des images : le MNS est donc obtenu par corrélation automatique. Nous utilisons un algorithme de corrélation par programmation dynamique issu des travaux de [BAILLARD 97]. Il a l'avantage de bien détecter les discontinuités de la surface topographique. Le corrélateur effectue un calcul par couple.

Comme on possède plusieurs images en recouvrement, les différents couples possibles sont corrélés séparément et les MNS résultats sont fusionnés. La fusion s'effectue simplement en prenant, pour chaque point, la médiane des altitudes des différents MNS. Un extrait du résultat de fusion de six couples est présenté figure B.2.3, page suivante. Les MNS calculés de cette manière répondent bien aux deux premiers critères de qualité. Par contre, les frontières des bâtiments sont assez nettement bruitées et délocalisées (figure B.2.3). Ceci est simplement dû à la taille des fenêtres de corrélation utilisées.

De même, du fait du bruit de corrélation, les surfaces planes (toits et surtout sol) sont dégradées par un bruit de faible amplitude, mais de très haute fréquence. À partir de ces images et du MNS, il semble donc naturel de vouloir calculer de vraies ortho-images. Cependant, les défauts résiduels du MNS empêchent une utilisation directe, car les résultats obtenus présentent des artefacts peu satisfaisants visuellement [BOLDO 99].

Amélioration du Modèle Numérique de Surface

Le MNS est donc dégradé par deux formes de bruit : délocalisation des discontinuités et bruit haute fréquence. Afin de corriger la délocalisation, nous allons tout d'abord calculer des gradients en superposition du MNS, par accumulation des gradients images. Puis le bruit haute fréquence sera corrigé par le calcul de plans sur une segmentation issue de cette accumulation. Cette segmentation permettra également la fusion des ortho-images (paragraphe « Fusion des ortho-images »).

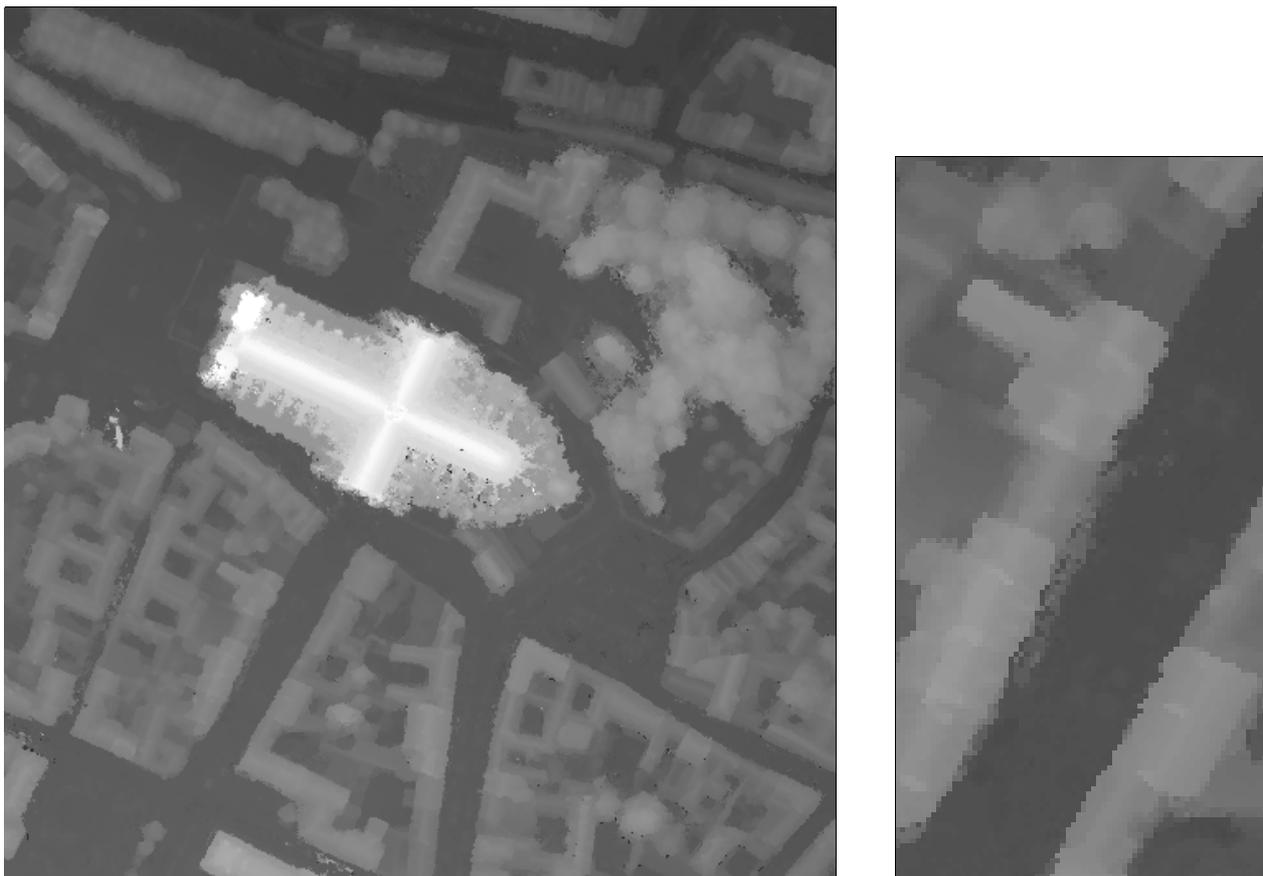


figure B.2.3 : MNS de corrélation fusionné et zoom sur des limites de bâtiments

Accumulation des gradients

La première étape consiste à calculer les gradients sur les images d'origine. Pour avoir des gradients ayant un sens aussi bien dans les zones à l'ombre que dans les zones au soleil, nous avons utilisé un gradient relatif, c'est-à-dire que le gradient habituel est normalisé par la somme des valeurs des pixels pris en compte. Les gradients ainsi calculés sont dans les espaces images. Nous allons les accumuler dans l'espace terrain, c'est-à-dire en superposition de la grille définie par le MNS. Nous obtiendrons donc une valeur de gradient d'accumulation pour chaque point du MNS.

Pour chaque point de la grille terrain définie par le MNS, nous avons besoin d'une plage d'altitude sur laquelle travailler. Pour la déterminer, nous utilisons le MNS. En effet, à part la délocalisation des discontinuités, les valeurs d'altitude du MNS sont très correctes. L'altitude réelle d'un point terrain est donc présente dans le voisinage de celui-ci. Il suffit donc de rechercher les altitudes minimales et maximales du MNS autour de ce point.

La zone de recherche est fonction de la délocalisation attendue du MNS, qui est elle-même liée aux caractéristiques de la corrélation, notamment de la taille des fenêtres de corrélation. Dans notre cas, la délocalisation peut atteindre 1-1,5 m, ce qui correspond à une fenêtre de 5-7 pixels.

Pour chaque point terrain, nous obtenons donc un intervalle de travail en $z : z \in [z_{min}, z_{max}]$. Nous allons parcourir cet intervalle avec un pas p_z .

Ce pas est calculé en fonction de la géométrie des images, pour vérifier le critère suivant : pour tout point terrain P , un changement d'altitude de p_z induit un décalage maximum d'un pixel de sa projection dans les images.

Pour chaque z nous projetons le point dans chaque image i et nous récupérons la valeur de gradient correspondante, notée $grad_i(z)$. Nous souhaitons obtenir un gradient unique à partir de l'ensemble des gradients des différentes images et pour tous les z .

Les propriétés souhaitées de ce gradient cumulé sont :

- insensibilité à la taille de l'intervalle de recherche : celle-ci dépend des erreurs du MNS ;
- insensibilité au nombre d'images pris en compte : ce nombre varie de 4 à 9, suivant la position du point et tous les points doivent avoir le même rôle dans la segmentation ;
- sensibilité à la non-cohérence : le gradient cumulé n'est important que si la majorité des gradients re-projetés le sont.

La formule retenue pour calculer le gradient cumulé à l'altitude z est : $gradcumule(z) = \sqrt[n]{\prod_{i=0}^n grad_i(z)}$

et nous conservons pour chaque point le gradient cumulé maximum $gradcumule = \max_{z \in [z_{min}, z_{max}]} gradcumule(z)$.

Cette approche donne une image de gradient dans l'espace terrain, superposable au MNS. Le résultat pour le MNS de la figure B.2.3 est présenté figure B.2.4, page suivante.

Segmentation

La segmentation de l'image de gradient calculée précédemment repose sur les travaux de L. Guigues [GUIGUES et al 01]. La méthode commence par une segmentation morphologique de l'image de gradient par le « partage des eaux », qui donne une sur-segmentation de l'image.

Les régions sont ensuite fusionnées selon un algorithme hiérarchique, qui assure qu'à tout moment le gradient moyen sur la frontière est supérieur au gradient interne. De plus, la simplicité des formes obtenues est prise en compte lors de la fusion, ce qui permet à l'algorithme de préserver les formes simples, et notamment les pans de toits. Un zoom sur la partie sud-ouest de l'image des labels résultat de l'algorithme complet de segmentation est présenté figure B.2.5, page suivante.

Calcul d'un MNS corrigé

À partir de cette segmentation il est possible de corriger le bruit haute fréquence du MNS. En effet, la segmentation est superposable au MNS. Il est donc possible, pour chaque région de cette segmentation, de lui associer l'ensemble des points du MNS qui lui appartiennent. Ces zones, qui ne comportent pas de contraste, sont supposées planes. Il semble donc naturel de tenter de calculer un nouveau MNS en calculant le plan associé à chaque région. Pour cela, il faut donc calculer le « meilleur » plan passant par un ensemble de points.

Dans notre cas, le plan ne peut être vertical et son équation peut donc s'écrire : $a \times x + b \times y + z + d = 0$.

Le problème est linéaire, sans contrainte. Par contre, nous sommes en présence d'un grand nombre de points aberrants, notamment à cause des délocalisations du MNS, qui génèrent des points à l'altitude des toits dans les zones de sol et inversement. Le problème est résolu en utilisant un M-estimateur [XU, ZHANG 96] pour l'estimation des plans à partir du nuage de points.

Après la détermination des plans de chaque région, l'altitude de chaque point est recalculée à partir de sa position 2-D et de son plan associé. La figure B.2.6, page 31, présente une vue générale du MNS recalculé à partir de la segmentation et du MNS d'origine (figure B.2.5 et figure B.2.3).



figure B.2.4 : image d'accumulation des gradients

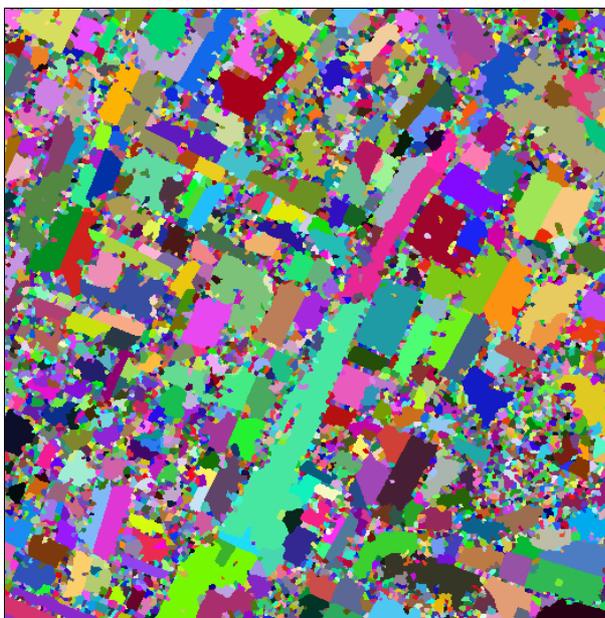


figure B.2.5 : zoom sur le résultat de segmentation et le MNS correspondant

Ce MNS a une apparence générale très semblable à celle du MNS d'origine. La figure B.2.7, page suivante, montre un agrandissement sur deux pans de toit de la cathédrale, qui permet de mieux visualiser les différences.

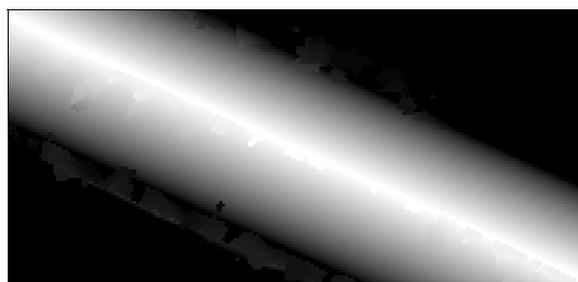


figure B.2.6 : modèle Numérique de Surface recalculé

Sur l'agrandissement ci-dessous, il est net qu'une grande partie du bruit de haute fréquence a été supprimée, sans pour autant lisser les limites de zone. De plus, les limites des pans de toits ont été régularisées et remplacées.



(a)



(b)

figure B.2.7 : comparaison des MNS : (a) MNS d'origine, (b) MNS recalculé

Calcul de l'ortho-image

À partir des données images et du MNS, le principal problème pour le calcul de l'ortho-image est la gestion des occultations. Nous commençons par présenter une méthode de calcul des ortho-images individuelles, puis la méthode de fusion de ces ortho-images individuelles.

Calcul des ortho-images utilisant la segmentation

Le résultat de segmentation est une image d'identifiant (ou labels) qui associe chaque pixel à un numéro de région. Notre problème ici est donc de calculer une ortho-image à partir d'une image unique, en prenant en compte les parties cachées. Pour cela, nous allons projeter le MNS et l'image des labels dans l'espace image, et nous considérons qu'une région ne peut se cacher elle-même, puisque c'est un plan. La projection du MNS donne l'altitude buffer (présenté figure B.2.8, page suivante) et celle de l'image des labels le label-buffer.

À partir de ce label-buffer, le calcul de l'ortho-image est très simple : il suffit de tester les valeurs des labels. Si la re-projection d'un point du MNS dans l'image tombe dans une zone de même label, le point est calculé par interpolation, sinon, il est considéré comme occulté. La figure B.2.9, page suivante, présente l'ortho-image calculée en utilisant la segmentation sur la même zone que précédemment.

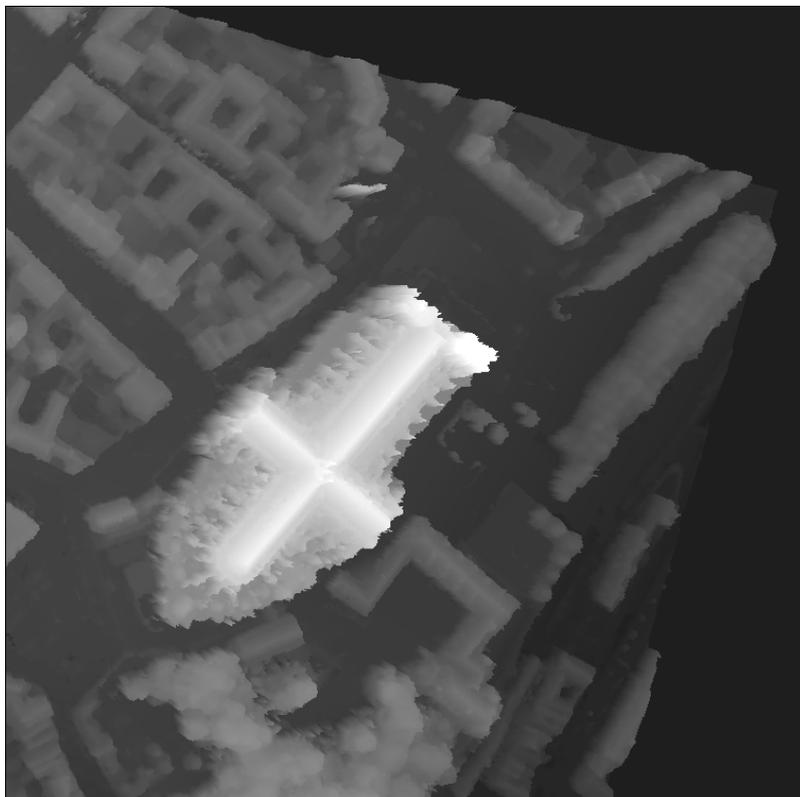


figure B.2.8 : altitude-buffer

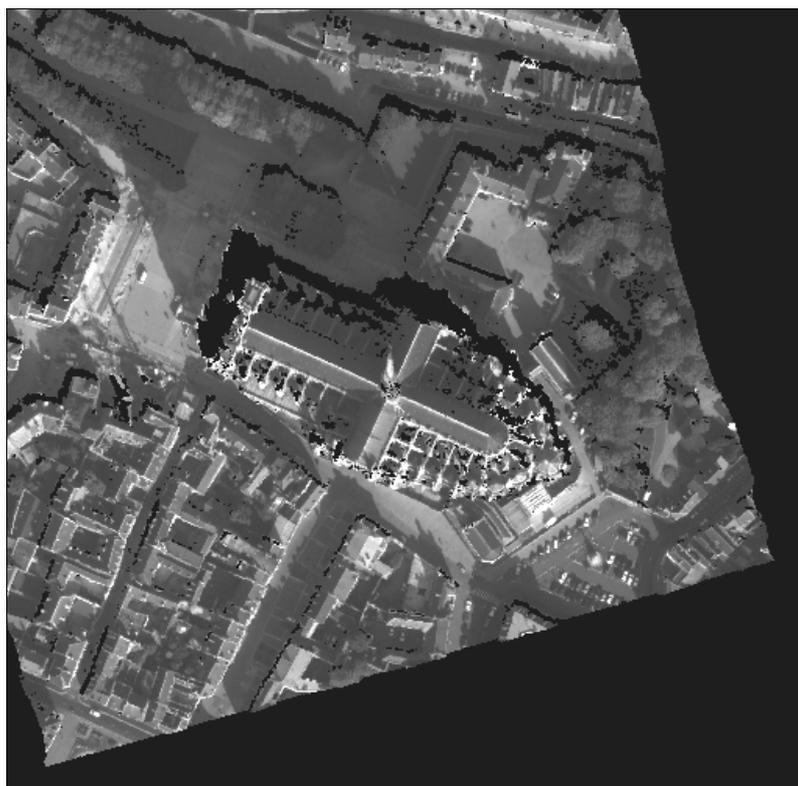


figure B.2.9
Ortho-image individuelle
(en noir : les occultations).

Fusion des ortho-images

Chaque image d'origine permet de calculer une ortho-image qui possède des zones d'occultation. Pour créer une ortho-image de l'ensemble de la zone où toutes les informations sont disponibles, il est donc nécessaire de fusionner les différentes ortho-images. Il est bien sûr possible de résoudre le problème de manière directe : chaque pixel est rempli par la première image dans laquelle il est visible, en créant un certain ordre entre les images.

Cet ordre peut être, par exemple, la distance au nadir. Malheureusement, ce type d'approche génère des artéfacts radiométriques, car chaque pixel est choisi indépendamment de ses voisins et les variations de couleurs peuvent être très brutales (voir un exemple figure B.2.10, à comparer avec la figure B.2.11, ci-dessous).



figure B.2.10 : artéfacts en fusion simple (à comparer avec la figure B.2.11)



figure B.2.11 : résultat de fusion par relaxation

Afin de limiter ce type de problèmes, il est préférable que l'ortho-image finale soit constituée de zones provenant de la même ortho-image de taille aussi grande que possible. Lorsque le changement d'image est inévitable, il est préférable de l'effectuer sur des contours afin qu'il soit aussi invisible que possible. Dans notre cas, la segmentation du MNS est également une segmentation de l'ortho-image, et nous allons l'utiliser pour la fusion. Le problème de la fusion peut se représenter sous la forme : déterminer pour chaque région la « meilleure » ortho-image d'où extraire les informations. La définition de cette « meilleure » ortho-image dépend des caractéristiques propres de chaque zone, mais également de l'ortho-image qui a été choisie pour les régions voisines.

Le but est de minimiser un coût de transition entre ortho-images, afin de rendre les limites aussi invisibles que possible. Il est alors utile de représenter la segmentation sous la forme d'un graphe d'adjacence où les nœuds sont les régions et les arcs sont les relations de voisinage. Si on adopte un formalisme probabiliste, nous pouvons définir, pour chaque région, des probabilités initiales et conditionnelles d'appartenance aux différentes ortho-images.

La résolution de ce problème peut alors s'effectuer par une relaxation probabiliste. Nous avons choisi la méthode de relaxation probabiliste proposée par Rosenfeld [ROSENFELD et al 76]. Cette méthode part d'un ensemble de probabilité initiale sur chaque nœud et de probabilité conditionnelles sur les arêtes. Pour les probabilités initiales, seul nous importe le fait que tous les points de la région soient visibles.

Pour un nœud i , on note $NbOccultes(e1)$ le nombre de pixels occultés si on choisit l'ortho-image $e1$ avec $e1 \in [1, NbOrtho]$.

La probabilité initiale $p(e1)$ que ce nœud soit dans l'état $e1$ est alors proportionnelle à $\exp(-NbOccultes(e1))$.

Cette fonction permet de défavoriser très fortement les ortho-images où il y a plus de quelques pixels occultés. La probabilité conditionnelle est liée au contraste généré par un changement d'ortho-image le long de la frontière associée. En effet, si le changement d'ortho-images ne génère aucun changement radiométrique sur la frontière, la limite sera invisible et ne nous gêne donc pas.

Soient i et j deux nœuds ayant une relation de voisinage. On souhaite calculer la probabilité que i soit dans l'état $e1$ sachant que j est dans l'état $e2$. Il est relativement simple de définir un coût radiométrique sur la frontière entre i et j , en fonction des différences le long de la frontière. Ce coût est la somme des carrés des différences le long de la frontière divisé par un facteur de normalisation T . Le choix de T correspond aux différences « acceptables » entre deux régions adjacentes. La probabilité est alors proportionnelle à $\exp(-Coût)$.

À partir de ces probabilités, il ne reste plus qu'à utiliser l'algorithme de relaxation, et, après convergence, il suffit de choisir, pour chaque zone, l'ortho-image qui a la probabilité la plus élevée. La figure B.2.11 présente le résultat de la relaxation sur la même zone que la fusion simple (figure B.2.10). On constate que la plupart des artéfacts de changement de couleurs très brusques ont disparu, donnant un meilleur aspect à l'image. La figure B.2.12, page suivante, présente l'ortho-image sur l'ensemble de la zone présentée figure B.2.3.

Correction des ombres

L'ortho-image qui vient d'être calculée a un défaut majeur : il reste de grandes zones d'ombres. Comme ce sont des images de caméra numérique, elles sont de très bonne qualité radiométrique. L'information sur ce qui est présent dans les zones d'ombre existe, elle n'est simplement pas visible. L'idée est donc de tenter de corriger ces zones d'ombres en les « ré-éclairant ».

Pour cela, nous allons utiliser une modélisation physique de l'éclairement reçu par les différents éléments du paysage. Ce modèle est spécialement adapté aux images grande échelle de zones urbaines, voir [BOLDO, LE MEN 01]. En fait, la valeur d'un pixel est proportionnelle à l'énergie qu'il reçoit E .

Quand un pixel observe le sol, l'énergie reçue est la somme de l'énergie provenant du sol E_{sol} et de l'énergie émise par l'atmosphère v (le voile atmosphérique). L'énergie émise par un élément de sol est égale au produit de l'énergie reçue E_{recu} par son albédo ρ : $E_{sol} = E_{recu} \times \rho$. On peut donc écrire : $pixel = v + E_{recu} \times \rho$.

À partir du modèle d'éclairement, il est possible de calculer E_{recu} et v . Il est donc possible de calculer l'albédo d'un point à partir de la valeur du pixel correspondant. Ensuite, pour les pixels à l'ombre, il suffit de rajouter l'éclairement du soleil (E_{soleil}) à E_{recu} et de recalculer la nouvelle valeur du pixel : $pixel = v + (E_{recu} + E_{soleil}) \times \rho$.

Un exemple d'utilisation de ce modèle est présenté figure B.2.12, page suivante. Deux types de problèmes apparaissent. Le premier est un ensemble de zones saturées en blanc. Il s'agit de zones sombres qui ont été considérées comme à l'ombre et qui ont donc été malencontreusement « ré-éclairées ». Elles sont donc trop claires. Le deuxième type de problème concerne les limites d'ombres : elles sont trop claires par rapport à la réalité. Ceci est dû à une imperfection de notre modèle radiométrique.

En effet, les zones d'ombres sont éclairées essentiellement par le ciel. Or, notre modèle considère que le ciel est uniforme, alors qu'en réalité celui-ci est beaucoup plus lumineux proche de la direction solaire. Cette erreur de modélisation crée des artéfacts aux bords des ombres, car c'est l'endroit où la différence entre le modèle et la réalité est le plus fort. Notre modèle permet de rendre visibles des détails qui étaient masqués auparavant.

Cependant, il introduit des artéfacts qui rendent certaines zones de l'image peu lisibles. Il est donc nécessaire de l'améliorer pour pouvoir utiliser ce type de correction. Deux types d'amélioration sont envisageables. D'une part, la localisation des zones d'ombres, en utilisant un autre algorithme pour les détecter. D'autre part, une amélioration de la modélisation du ciel, mais cela exige de disposer de modèles beaucoup plus précis et complets. Des modèles plus complets sont testés actuellement au laboratoire.

Conclusion et perspectives

Cet article a présenté une méthode de construction automatique de vraies ortho-images, en n'utilisant que les données images. Cette méthode commence par une amélioration du MNS qui s'appuie sur une segmentation de celui-ci par accumulation des gradients.

Cette amélioration du MNS donne de bons résultats si le MNS en entrée est suffisamment précis pour qu'il n'y ait que peu d'ambiguïté lors des re-projections des gradients. Les ortho-images résultats sont très lisibles, sans artéfacts visibles, à part quelques zones où il n'y a pas d'information (zones noires). Or, les ortho-images sont essentiellement utilisées pour des applications visuelles, et ce critère est donc le plus important, même s'il est très difficile à évaluer objectivement.



figure B.2.12 : ortho-image finale corrigée des ombres

Références

- [AXELSSON 99] P. Axelsson : *Processing of laser scanner data - algorithms and applications*, in ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 54 : 138-147, 1999.
- [DEQUAL et al 01] S. Dequal, A. Lingua and F. Rinaudo : *Laser scanner data for true digital orthorectification*, in Proceedings of OEEPE workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Elevation Models, Stockholm (S), OEEPE, 2001.
- [KNABENSCHUH 95] M. Knabenschuh : *Generation and use of digital orthophotos*, 2nd Course on digital photogrammetry, IFP, Bonn (D), 1995.
- [RAU, CHEN 00] J.Y Rau & L.C. Chen : *Occlusion compensation in orthophotos*, in GIM International, 2000.

[ROSENFELD et al 76] A. Rosenfeld, R.A. Hummel & S.W. Zucker : *Scene labelling by relaxation operations*, in IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1976.

[TRIGLAV 00] J. Triglav : *Coming in : Better orthophotos*, in Geoinformatics, 2000.

[XU, ZHANG 96] G. Xu & Z. Zhang : *Epipolar geometry in stereo, motion and object recognition*, 1996.

Publications

[BAILLARD 97] C. Baillard : *Analyse d'images aériennes stéréoscopiques pour la restitution 3-D des milieux urbains*, thèse de doctorat, ENST, laboratoire MATIS, IGN-SR-97-005-C-THE-CB, 1997.

[BOLDO 99] D. Boldo : *Vers l'ortho-photographie avec bâtiments redressés*, in Bulletin d'Information de l'IGN n°71, 2000/3, pages 17-26, laboratoire MATIS, IGN-SR-99-004-C-ART-DB, 1999.

[BOLDO, LE MEN 01] D. Boldo & H. Le Men : *Remote sensing model adaptation to very high resolution digital images of urban areas*, IEEE/ISPRS Joint workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas, Rome (I), laboratoire MATIS, IGN-SR-01-020-C-COM-DB, 2001.

[GUIGUES et al 01] L. Guigues, H. Le Men & J. P. Cocquerez : *Segmentation d'image par optimisation d'un critère MDL dans une pyramide de segmentation*, in Actes du congrès GRETSI'01, Toulouse (F), laboratoire MATIS, IGN-SR-01-022-C-COM-LG, 2001.

[LE MEN, BOLDO 00] H. Le Men & D. Boldo : *Mosaïque automatique d'ortho-photographies*, in Actes du congrès RFIA, Paris (F), laboratoire MATIS, IGN-SR-00-002-C-COM-HL, 2000.

[PAPARODITIS et al 00] N. Paparoditis, C. Thom & H. Jibrini : *Surface reconstruction in urban areas from multiple views with digital aerial frame camera*, in IAPRS Conference Proceedings, laboratoire OEMI, IGN-SR-00-005-L-NP, 2000.

[THOM, SOUCHON 99] C. Thom & J.-P. Souchon : *The IGN digital camera system in progress*, Photogrammetric Week'99, Stuttgart (D), laboratoire OEMI, IGN-SR-99-006L-COM, 1999.

B.3 Le levé laser aéroporté : techniques, applications et recherche

Olivier de Joinville, Sébastien Saur & Frédéric Bretar

Introduction, historique

Le levé laser aéroporté a vu le jour avec l'Airborne Profile Recorder (APR) en 1970. Cet appareil permettait d'enregistrer un profil altimétrique par avion et déterminait l'altitude d'un point en combinant les mesures de deux instruments : un altimètre barométrique et un distance-mètre radar. Jusqu'au début des années 90, les lasers profileurs faisaient des coupes altimétriques de terrain.

Une nouvelle technologie, les lasers scanneurs, a été développée dans les années 95. Elle permet d'effectuer un balayage perpendiculaire au mouvement du vecteur et donc de couvrir des zones de terrain plus vastes nécessitant moins de lignes de vol. Les systèmes laser aéroportés offrent une acquisition rapide et précise de points 3-D, en mesurant la distance entre un avion (ou un hélicoptère) et le sol. Ils suscitent depuis quelques années un intérêt grandissant auprès de la communauté scientifique et métrologique mondiale, d'autant plus que la rapidité d'obtention de données 3-D, la bonne précision altimétrique en tous milieux et leur coût abordable, les posent en concurrents très sérieux des techniques d'acquisition 3-D par restitution photogrammétrique ou par corrélation.

Dans le cadre de la production de modèles numériques de terrain, les systèmes laser aéroportés permettent *a priori* d'atteindre des performances difficilement accessibles par d'autres techniques, aussi bien sur le plan de la précision et de la densité qu'en ce qui concerne les rendements au km². Il apparaît donc naturel d'évaluer l'apport d'une telle technologie pour la réfection de la BD Alti, base de données altimétrique de l'IGN. Après un rappel sur le fonctionnement des principaux systèmes laser et de leurs applications générales, nous discuterons de l'évaluation des données issues d'un vol laser sur la ville d'Amiens puis nous présenterons le vol laser effectué en zone rurale (dans le Vaucluse) en vue d'évaluer l'apport de cette technique dans la réfection de la BD Alti, pour enfin donner un état de l'art des recherches à venir au laboratoire MATIS.

Fonctionnement et applications

Olivier de Joinville

Acquisition

Principe général

Le principe de fonctionnement des systèmes laser est simple [JOINVILLE et al 02] : une série d'impulsions est émise à très haute fréquence (jusqu'à 83 kHz), puis est réfléchiée par le sol. La distance entre le sol et l'avion est ensuite évaluée en fonction de la mesure du temps de retour de l'impulsion. La plupart des systèmes fonctionnent dans des longueurs d'onde appartenant au proche infrarouge (de 1 000 à 1 500 nanomètres). Afin d'assurer une localisation spatiale précise de l'émetteur-récepteur laser, les LIDAR (Light Detection And Ranging) utilisent un système de positionnement composé d'un récepteur GPS embarqué et d'une centrale inertielle (INS). Il est préférable en outre de disposer d'au moins une station GPS au sol, à proximité de la zone de vol, pour améliorer la précision géographique du capteur (figure B.3.1).

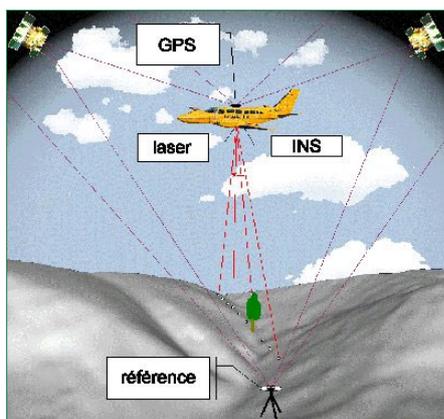


figure B.3.1

Principe d'acquisition des mesures laser.

Différentes techniques de balayage

Plusieurs méthodes de balayage du terrain ont été mises au point par les différents constructeurs afin d'optimiser la densité et l'homogénéité des points 3-D mesurés au sol.

Miroir oscillant

Le miroir est en rotation autour de l'axe de vol et crée des lignes en dents de scie. C'est le système le plus répandu (Optech et LHS), voir figure B.3.2, ci-dessous.

Faisceau de fibres

C'est le système adopté par la société allemande TopoSys. Il se présente sous forme d'un pinceau de fibres optiques (cent vingt-huit, actuellement) dans lesquelles les impulsions laser sont distribuées à très haute fréquence (83 KHz) par un moteur rotatif. Ce système performant présente malgré tout l'inconvénient d'avoir une répartition des points beaucoup plus dense dans le sens de la trajectoire de l'avion que dans le sens perpendiculaire (environ 20 cm à 1 000 m pour 1,2 m perpendiculairement à la trace), voir figure B.3.2, ci-dessous.

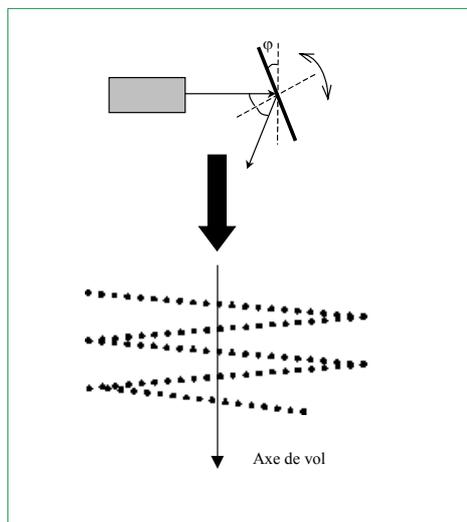


figure B.3.2 : principe du miroir oscillant

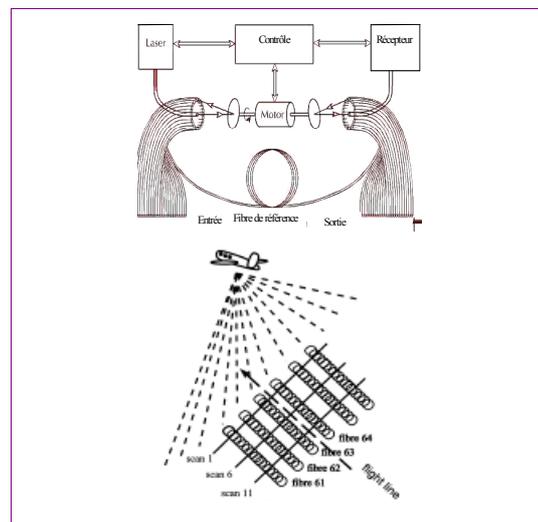


figure B.3.3 : principe du faisceau de fibres (©TopoSys)

Deux techniques sont actuellement étudiées par l'université de Stuttgart, elles visent à obtenir une répartition plus homogène au sol :

Miroir rotatif à axe incliné

Le miroir tourne autour d'un axe légèrement incliné, engendrant une déviation du faisceau et des traces elliptiques. Ce principe appelé ScaLARS et développé par l'université de Stuttgart semble améliorer l'homogénéité de la répartition des points au sol.

Polygones en rotation

Ce système combinant plusieurs miroirs en rotation autour d'un axe produit des lignes parallèles. C'est en fait le même principe que celui du miroir oscillant, mais sans retour. Ce système assure une couverture assez homogène de la zone couverte.

Paramètres caractéristiques

Le tableau B.3.1, page suivante, décrit différents paramètres caractérisant les systèmes laser dont certains sont directement liés aux capacités de l'instrument (fréquence, divergence...). Si l'on veut, par exemple, faire du levé en zone urbaine, il faudra éviter d'utiliser un angle de balayage trop élevé afin de limiter le nombre d'occultations, même si cela nécessite un nombre de bandes supérieur.

tableau B.3.1 : paramètres de vol des systèmes laser

Paramètres techniques	
Fréquence des impulsions	Typiquement 10 à 30 kHz, jusqu'à 83 kHz.
Angle de balayage	Typiquement 10° à 45°, 75° maxi.
Fréquence de balayage	Quelques dizaines de lignes par seconde.
Nombre d'échos enregistrés par impulsion émise	Jusqu'à 5, en milieu forestier.
Fréquence d'acquisition des mesures GPS/INS	GPS : de 1 à 10 Hz, INS : 50-200 Hz.
Divergence du faisceau laser	De l'ordre de 0,5 mrad soit environ 10 cm au sol à 1 000 m.

Paramètres de vol	
Hauteur de vol	De 100 jusqu'à 3 000 m, 6 000 m maxi.
Vecteurs	Hélicoptère ou avion.
Densité des points	De 0,1 à 5 points par m ² .
Largeur de bande	Environ 580 m pour un angle de balayage de ±20° et une hauteur de vol de 800 m. 2 400 m pour un angle de balayage de 45° et une hauteur de vol de 3 000 m.

On constate que la fréquence d'acquisition du GPS et de l'INS (respectivement ~1 Hz et ~100 Hz) est beaucoup plus faible que la fréquence d'acquisition des points (~50 kHz). Ceci suppose une interpolation de la position et des angles d'attitude de l'avion pour connaître la position et l'orientation du faisceau laser à chaque impulsion. La fréquence des impulsions combinée avec la vitesse de vol du vecteur permet d'obtenir une densité de points au sol se situant entre 0,1 et 5 points par m².

Des survols à très haute altitude (6 000 m) sont depuis peu possibles. Ils permettent de couvrir des surfaces très importantes, mais la densité de points au sol et la précision des mesures sont beaucoup plus faibles qu'à une altitude moindre. Il apparaît de plus qu'à cette altitude, la vitesse de l'avion est, en général, plus élevée et que le signal est fortement atténué par la traversée de l'atmosphère.

Echos multiples

Une des principales caractéristiques du laser est la séparabilité du faisceau, enregistré sous forme d'échos multiples : il arrive en effet fréquemment que le rayon se divise en deux parties : une partie est réfléchiée par un objet en sursol (végétation, bâti) et l'autre atteint le sol pour s'y réfléchir. La plupart des systèmes n'enregistrent que deux échos. En faisant la différence des cartes altimétriques du premier et du dernier écho, on voit apparaître distinctement la végétation ainsi qu'une partie des bords de bâtiment.

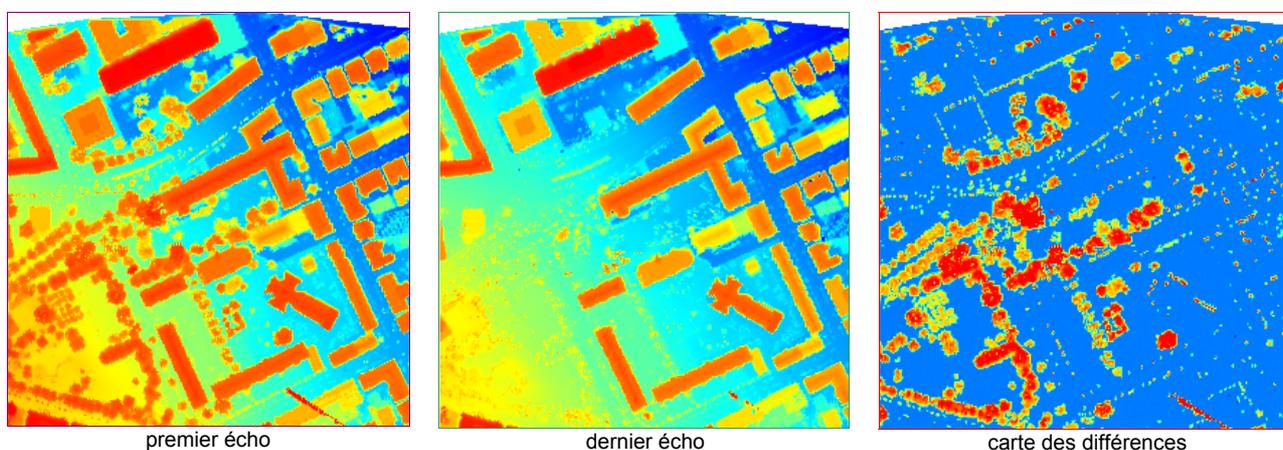


figure B.3.4 : visualisation d'une carte altimétrique premier écho, dernier écho et d'une carte de différences

Données de réflectance

Certains LIDAR aéroportés enregistrent de plus une information de réflectance. Celle-ci fournit une information sur la quantité de signal reçue et dépend essentiellement de la nature du matériau rencontré par le rayon laser. Elle n'est que peu corrélée aux cartes altimétriques comme le montre la figure B.3.5.

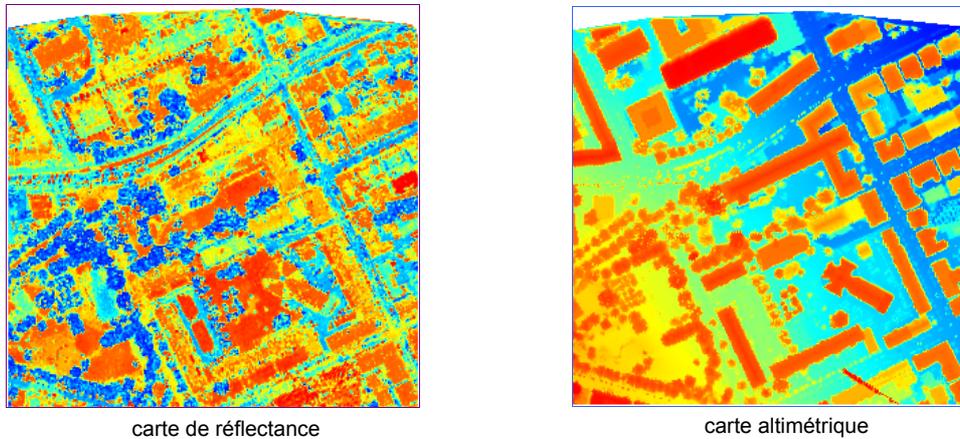


figure B.3.5 : carte de réflectance et carte altimétrique

Applications

En milieu forestier [HAUGERUD, HARDING 01]

À l'identique de la situation rencontrée sur les bords de bâtiments, le rayon peut pénétrer la végétation et réfléchir un ou plusieurs échos. Le premier représente souvent la canopée, tandis que le dernier écho se situe généralement au niveau du sol. La figure B.3.6 montre clairement les réflexions des sommets des arbres, distinctement des réflexions du sol.

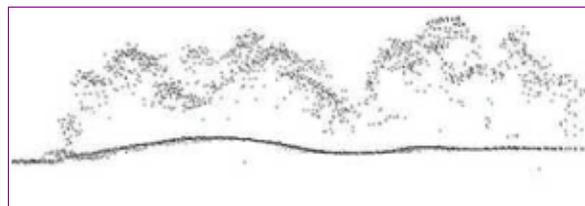


figure B.3.6 : coupe altimétrique laser en milieu forestier

MNS de sites urbains

Les modèles numériques de surface restitués par laser aéroporté en milieu urbain sont essentiellement destinés aux opérateurs de télécoms, mais d'autres applications peuvent être envisagées, notamment la génération de modèles d'écoulements lors de crues ou la détection de changements. Comme nous le verrons dans la deuxième partie avec le vol sur la ville d'Amiens, les MNS laser en zone urbaine souffrent de quelques imperfections (contours rarement rectilignes, façades souvent lissées par les interpolations entre les points et donc rarement verticales...).

MNT

Il existe de nombreux logiciels de classification sol/sursol [KRAUS, PFEIFER 01] qui permettent de filtrer les points du sursol pour n'obtenir que des points contenant le sol et donc un MNT. Sur la figure B.3.8, page suivante, on voit que la partie inférieure gauche ne comprend plus ni les bâtiments, ni la végétation à la suite de son filtrage.

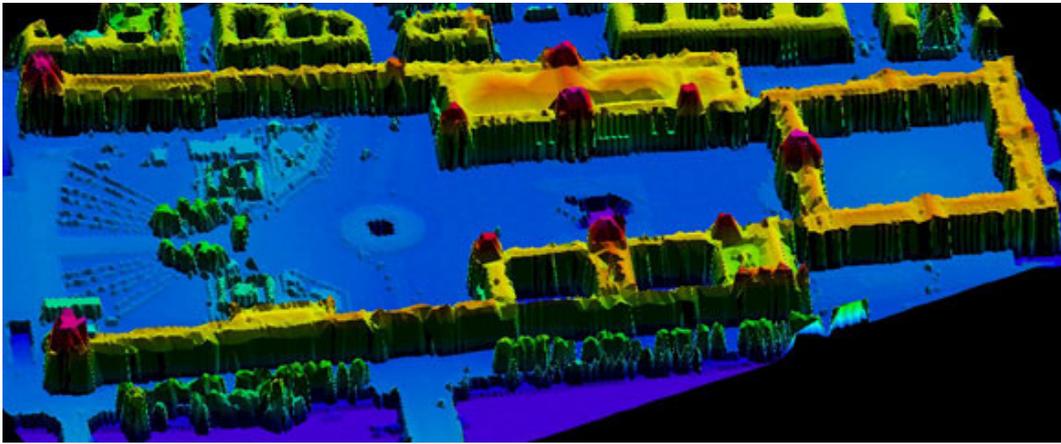


figure B.3.7 : modèle 3-D du Louvre dérivé d'un nuage de points laser

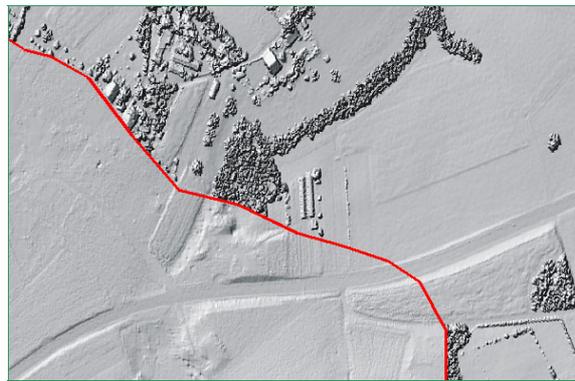


figure B.3.8 : exemple de classification sol-sursol

Surveillance de risques naturels et suivi de côtes

Le levé laser a déjà été utilisé pour l'étude de mouvements de terrain. Cette application profite, en plus de la précision, de la rapidité d'acquisition et de la disponibilité des modèles. De même, des applications existent pour la détection de changements suite à un tremblement de terre ou pour la prévision de risques d'inondation. La surveillance des côtes (figure B.3.9) peut se faire avec des lasers dédiés à la bathymétrie ayant un pouvoir de pénétration important dans l'eau très claire.

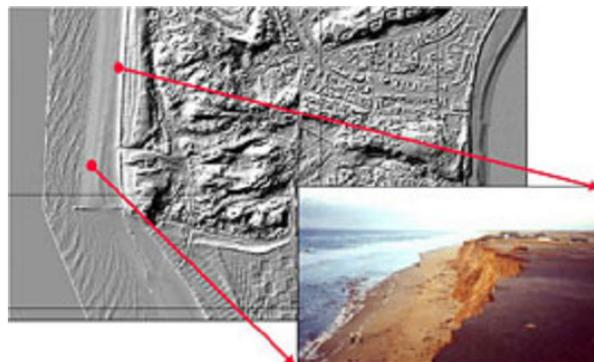


figure B.3.9 : application du laser aéroporté pour le suivi des côtes (©TopoSys)

Relevé de corridor

Le levé laser est également employé pour des projets linéaires de faible largeur, comme le levé le long de lignes à haute tension (figure B.3.10, page suivante), ce qui permet de localiser rapidement les obstacles (par exemple : des arbres) présentant un danger potentiel.

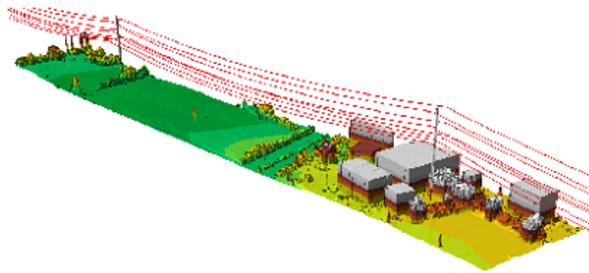


figure B.3.10 : relevé d'une ligne à haute tension (©TopoSys)

Projets de grande envergure

Deux projets à l'échelle nationale sont actuellement en cours. Ils concernent un pays très montagneux, la Suisse, pour l'amélioration de son MNT (précision de 30 à 50 cm) et un pays très plat, la Hollande, essentiellement pour le suivi de la montée des eaux aux abords des côtes [IRISH, LILLYCROP 99].

La reconstruction 3-D de bâtiments [VOSSelman, SUVEG 01], [HAALA, BRENNER 99] est une application qui fait encore partie du domaine de la recherche. Celle-ci peut se faire uniquement avec les points 3-D ou avec l'apport de données externes comme le cadastre.

Vol sur Amiens

L'IGN a sous-traité ce vol auprès de la société Toposys pour tester les performances du laser aéroporté en zone urbaine et péri urbaine. L'IGN possédant un chantier complet d'images numériques sur la ville d'Amiens, il semblait logique de faire ce vol-test sur la même zone. Ce vol s'est déroulé dans des conditions climatiques très favorables, à savoir un temps sec et clair ce qui a permis d'obtenir un pourcentage très important d'échos fiables.

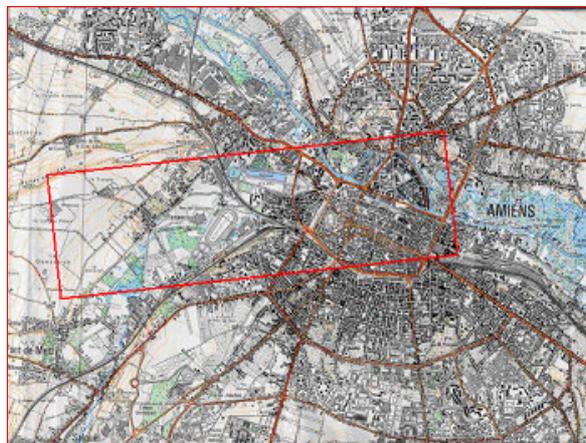


figure B.3.11 : zone de survol laser sur Amiens

Caractéristiques techniques du vol

- quatorze bandes longitudinales d'environ 250 mètres de large chacune et une de contrôle dans le sens transversal ;
- GPS différentiel sur station de référence proche d'Amiens ;
- densité : environ 4 à 5 points par m² ;
- altitude : 1 000 m/sol ;
- superficie : environ 10 km².

Différents travaux d'évaluation de données laser ont déjà été effectués dans la littérature [CASELLA 01].

En ce qui nous concerne, les données (données brutes premier et dernier écho et MNS) ont été évaluées suivant le protocole suivant :

- *des évaluations intrinsèques* (sans référence), les données sont projetées sur une grille et l'on peut visuellement se rendre compte de la distribution des points dans l'espace. Les évaluations intrinsèques nous ont permis de constater que la répartition des points est assez inégale du fait du système lui-même et du fait que certaines zones sont couvertes par une seule bande et d'autres par plusieurs. Cette répartition inhomogène laisse présager certains défauts dans les MNS, que l'on a pu constater en analysant la qualité des MNS créés par Toposys.

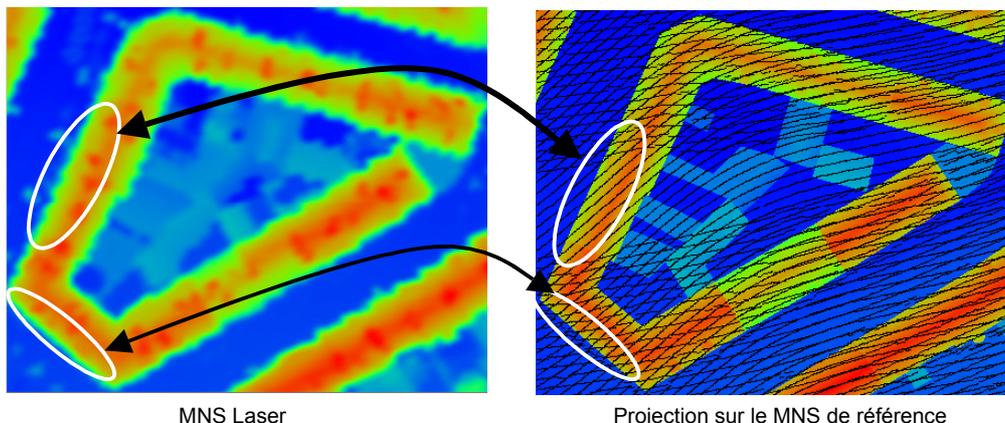


figure B.3.12 : différence de contours en fonction de la densité de points

- *des comparaisons du MNS laser avec un MNS de référence* (TRAPU) sur le plan altimétrique par mise en géométrie commune et différence pixel à pixel et sur le plan planimétrique par extraction de contours du MNS laser et comparaison avec le contour de référence ;
- différents types de toits ont été étudiés : plats, bipente et monopente ;
- les histogrammes d'erreurs (exactitude altimétrique) présentent un ou plusieurs modes. Certains sont bien centrés avec un biais très faible, ce qui indique que les résultats sont proches de la référence dans l'ensemble. D'autres font ressortir un biais provenant la plupart du temps du fait que le laser a détecté certains objets (cheminées, mansardes,...) qui n'apparaissent pas toujours dans la référence ;
- les écarts-types des erreurs sont assez peu élevés, en effet le laser est un système fiable : sur la même surface les mesures sont très peu bruitées ;
- *des comparaisons des MNS Laser avec des MNS de corrélation* : les MNS laser et de corrélation ont été comparés avec les MNS Trapu. Les statistiques font ressortir un bruit important dans les MNS multi-corrélation par rapport aux MNS Laser sur certains pans de toit, ceci provient du manque de robustesse du coefficient de corrélation multi-images dans les zones peu texturées.

Application à la BD Alti

Sébastien Saur

Introduction

Contrairement à la quasi totalité des applications actuelles des lasers aéroportés (modèles de forte densité et haute précision), notre objectif est ici la constitution d'une base de référence altimétrique, de précision métrique, et d'une densité après traitements de l'ordre d'un point tous les cinq mètres, environ. Les besoins en réfection portent principalement sur les zones de moyenne et haute montagne où la qualité BD Alti existante est la plus faible.

Le test s'est déroulé du 19 août au 3 septembre 2002 en collaboration avec la société LH Systems (Leica Helava Systems), selon les modalités suivantes : prêt et installation d'un système ALS 40, démonstrations (manipulations et post-traitement des données) réalisées par LHS, l'IGN fournissant l'avion et finançant les vols. Les tests ont eu lieu sur des zones diverses selon des spécifications définies par l'IGN et compatibles avec l'objectif de réfection de la BD Alti.

Caractéristiques du matériel testé

Le système Leica Helava Systems ALS 40 embarqué présenté en figure B.3.13, page suivante, est constitué de trois éléments principaux : le scanner laser à balayage proprement dit (A), un rack informatique (B) et un ordinateur portable de pilotage (C).

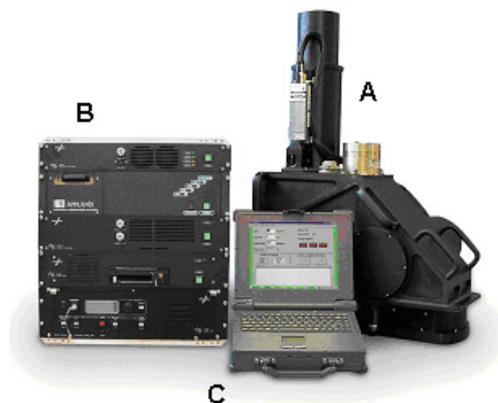


figure B.3.13 : le laser aéroporté ALS 40

Le scanner laser (A) est principalement constitué d'un émetteur laser à impulsion, d'un système de miroirs dont l'un est oscillant, d'un système de réception à diode et d'une centrale inertielle APPLANIX.

Le rack informatique (B) comporte le système de positionnement (récepteur GPS et centrale inertielle APPLANIX) avec le lecteur de carte PCMCIA pour le stockage de ces données, le périphérique de stockage des données laser (disque dur extractible) et l'alimentation de l'ensemble.

Le tout est contrôlé par l'intermédiaire du PC portable : tests de fonctionnement, commande du système... Ce PC fonctionne sous Windows 98 et peut être utilisé par l'intermédiaire de son écran tactile, ce qui en vol est plus pratique que le dispositif de pointage classique.

Les caractéristiques physiques du système sont les suivantes :

Angle de balayage	10 à 75°
Hauteur de vol	500 à 3 000 m 500 à 6 100 m avec un miroir oscillant plus large
Fréquence de balayage maximum	34,1 Hz à 45° d'angle de balayage (petit miroir) 24,4 Hz à 75° d'angle de balayage (petit miroir) 11,3 Hz à 45° d'angle de balayage (grand miroir) 8,8 Hz à 75° d'angle de balayage (grand miroir)
Fréquence maxi. des impulsions	15 à 50 kHz (en fonction de la hauteur de vol)
Nombre de retours enregistrés	1 à 3 (avec intensité) 1 à 5 (sans intensité)
Système GPS	Bi-fréquence 2 Hz
Système inertiel	Applanix AIMU 200 Hz

Fonctionnement

Installation

Le système laser a été relativement aisé à installer sur la trappe avant du Beechcraft Super King Air F-GALP de l'IGN, moyennant la fabrication par les ateliers du SAA de deux pièces métalliques permettant d'utiliser les trous de fixation existants pour les chambres RMK TOP. Le rack a été sangle sur le coté gauche de l'appareil. Une antenne GPS bi-fréquence a été installée sur l'avion à côté du GPS de navigation.

Les photos suivantes (figures B.3.14 et B.3.15, page suivante) montrent l'installation réalisée.



figure B.3.14

Le rack informatique installé dans le Beechcraft.

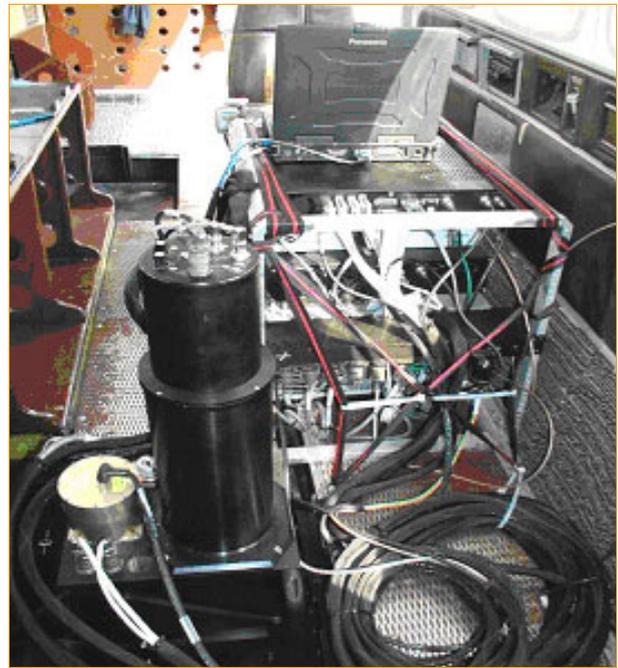


figure B.3.15

l'ALS 40 et ses connexions avec le rack informatique.

Fonctionnement en vol

Système de positionnement

Afin d'obtenir la meilleure qualité de trajectoire possible, il faut être prudent quant à la station GPS de référence. Toute la géométrie est issue de ce calcul de trajectographie combinant les données GPS et inertielles, aucun processus d'ajustement (similaire à une aérotriangulation, avec points d'appui et points de liaison entre bandes) n'existait dans le cas présent.

La station de référence doit être constituée d'un récepteur bi-fréquence capable d'enregistrer à une fréquence d'au moins 1 Hz (2 Hz sont préférables, puisque le récepteur embarqué travaille à cette fréquence). De plus, il doit être à distance raisonnable de la zone à couvrir : à moins de 30 km du lieu d'initialisation du système (au sol ou en l'air) et à moins de 80 km de la zone à couvrir. Ceci peut être assuré par plusieurs récepteurs, par exemple plusieurs stations du réseau géodésique permanent (RGP). A l'heure actuelle, seules dix-sept stations du RGP enregistrent en permanence à une fréquence de 1 Hz, ce qui imposerait soit l'envoi d'opérateurs sur zone pour y installer un récepteur, soit la modification temporaire des paramètres de réception des stations du RGP. A terme, la densité prévue du RGP devrait être suffisante pour ce type d'application.

D'autre part, le comportement de la centrale inertielle dépend de la longueur des axes de vol. Plus l'axe sera long, plus la dérive dans la mesure des angles et des accélérations sera importante, ce qui dégradera le positionnement des points au sol. Les axes réalisés sur le Vaucluse faisaient 17 km de long. On n'a pas noté d'effet de dérive de la centrale Applanix, qui auraient pu se traduire par des décalages altimétriques et planimétriques entre bandes plus importants aux extrémités. Toutefois, dans l'optique de la réfection de la BD Alti, les axes de vol seraient certainement plus longs et donc ces problèmes seraient à étudier plus en détail.

Contrôle de l'ALS 40

Le PC portable fournit des indicateurs de fonctionnement des différents éléments du système (émission laser, réception laser, inertiel, GPS, enregistrement). Toutefois, il faut noter que lors de la panne du système de détection survenue jeudi 22 août, le seul message était que le système recevait zéro retour. De plus, les tests au sol effectués avant le décollage n'ont pas mis le problème en évidence : en effet, l'ALS 40 possède deux systèmes de détection, un pour le vol et l'autre pour les tests au sol ...

Paramétrage de l'ALS 40

Quatre paramètres sont à définir avant l'acquisition des données : angle de balayage, fréquence de balayage, fréquence des impulsions et intervalle de distance. Ce dernier paramètre permet de filtrer automatiquement des retours qui ne sont évidemment pas au sol (nuages, par exemple).

En principe, le choix des paramètres s'effectue au sol à l'aide du logiciel de planification fourni. Toutefois, il est parfois nécessaire d'ajuster en vol les paramètres choisis pour se donner une marge de sécurité. En cours d'acquisition, on peut contrôler les distances mesurées au nadir et de chaque côté de la fauchée, le système de positionnement GPS et inertiel et le taux de retours.

Les vols effectués avec l'ALS 40

Vol de calibration

L'objectif du vol de calibration est de déterminer certains paramètres du système : systématismes dans la mesure de distance, erreurs d'alignements entre la centrale inertielle et le scanner laser, position relative de l'antenne GPS et de l'INS.

Pour cela, on survole quatre fois une même zone sur laquelle on dispose de points de contrôle connus en X, Y et Z. On a utilisé la base de Creil et son polygone d'essai (trente-cinq points connus à quelques millimètres, déterminés en 1991). Les quatre axes de vol sont perpendiculaires deux à deux, à deux altitudes différentes (on a volé à 1 500 et 3 000 pieds au-dessus du sol) et en sens inverse à chaque passage (par exemple nord-sud et ouest-est à 1 500 pieds, puis sud-nord et est-ouest à 3 000 pieds).

Un premier vol commencé le 22 août a été interrompu lorsqu'une panne sur l'ALS 40 a été constatée. La calibration a été réalisée le lendemain après réparation du système.

Vol sur Paris et le Mont Pagnotte

À la demande de Leica France, on a effectué un axe de vol au-dessus de Paris entre la Défense et le Louvre, à l'altitude limite (6 600 pieds), avec un angle de balayage de 45° (22,5° de part et d'autre de l'axe vertical), ce qui donne une densité de points au sol d'un point pour 5 m².

Le Mont Pagnotte est une zone boisée à proximité de Creil. Ce vol est destiné à estimer les performances du laser à haute altitude sur une zone boisée. Un seul axe de vol était prévu avec des caractéristiques identiques à celles utilisées sur le Vaucluse (3 000 m, 45°, un point pour 8 m²). Ce vol a eu lieu le samedi 24 août entre 18 et 20 heures, en raison du trafic aérien et des conditions météorologiques. Au retour de ce vol, un axe à 3 000 m a de nouveau été réalisé au-dessus du site de Creil pour contrôler la calibration.

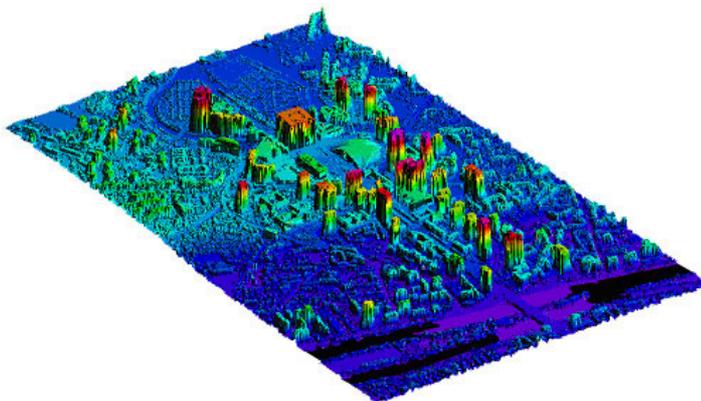


figure B.3.16 : MNE sur le quartier de la Défense, vol laser du 24 août 2002

Vol sur le Vaucluse

Initialement, il était prévu de traiter une seule zone de moyenne montagne dans des conditions qui pourraient être celles de la réfection de la BD Alti par laser. Le site des dentelles de Montmirail (département du Vaucluse) a été choisi pour son relief accidenté (600 m de dénivelée sur 120 km²), et pour la disponibilité de données BD Topo qui pourront servir de référence.

Les paramètres choisis pour le vol sont les suivants :

- angle de balayage : 45° ;
- hauteur de vol : 3 000 m ;
- fréquence de balayage : 26 Hz ;
- fréquence des impulsions : 22 kHz ;
- recouvrement entre bandes : 20% ;

- largeur de fauchée utile : 2 100 m, soit cinq axes de vol ;
- densité de points au sol : 1 point / 8 m² en moyenne.

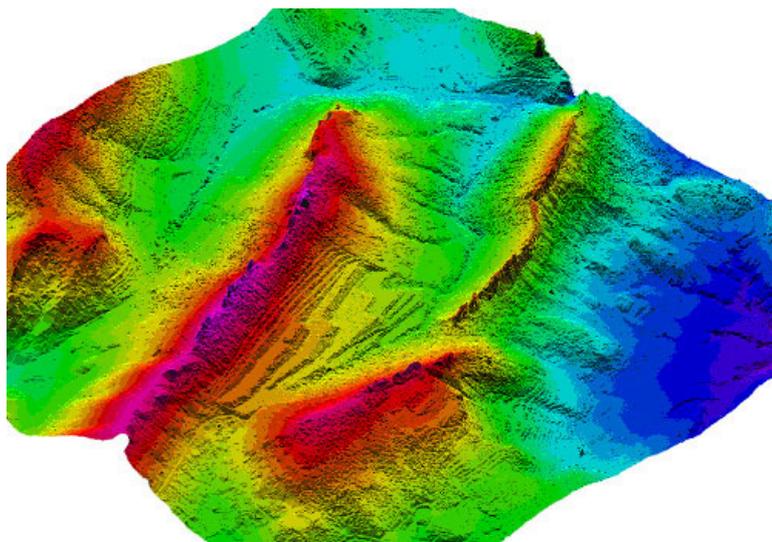


figure B.3.17 : dentelles de Montmirail (Vaucluse, extrait) vol laser du 3 septembre 2002

Résultats

La comparaison avec les points de contrôle a été faite en réalisant sur chaque zone une classification du sol à partir des points laser, puis une triangulation dans laquelle les altitudes correspondant aux points de contrôle sont interpolées.

Comparaison avec les points de contrôle

Lors du vol de calibration, les résultats obtenus ont montré un écart altimétrique moyen (interprété comme un biais) sur les points de contrôle du polygone de Creil de l'ordre de 80 cm avec un écart-type de l'ordre de 7 cm (pour des hauteurs de vol à 450 m et 900 m). Le biais a pu être totalement compensé par le processus de calibration.

Lors du contrôle de la calibration réalisé le lendemain, l'analyse des points de contrôle donne un biais résiduel de 2 cm avec un écart-type de moins de 10 cm, pour un vol à 3 000 m au-dessus du sol. Sur la zone du Vaucluse, les écarts altimétriques entre les données brutes (points non filtrés) et les six points de contrôle réalisés par GPS font apparaître une erreur moyenne de 22 cm pour un écart-type de 20 cm. L'erreur moyenne relativement forte peut provenir uniquement du faible nombre de points de contrôle disponibles et donc ne pas être significative. Seule la comparaison des données laser avec d'autres MNT (BD Topo, par exemple), même s'ils sont intrinsèquement moins précis, pourra permettre d'obtenir des statistiques plus robustes.

Comparaison avec les données BD Topo

Sur Paris, on a comparé les données laser avec le réseau routier de la BD Topo (plus de 12 000 points).

Du fait de l'étendue de la surface survolée sur le Vaucluse (120 km²), on a sélectionné trois zones représentant des types de paysage différents : falaises, collines boisées et plaine. La comparaison a été faite par rapport au MNT BD Topo.

Laser - BD Topo	Vaucluse			Paris
	Plaine	Collines	Falaises	Réseau routier
Moyenne des écarts	-0,80 m	-0,26	-0,47	-0,31 m
EMQ à 100%	1 m	2,25 m	2,67 m	1,75 m
EMQ à 98%	0,90 m	1,98 m	1,86 m	1,13 m

Les écarts les plus forts donnent toujours un MNT laser plus bas que le MNT BD Topo. Ce résultat s'explique par le fait que la classification du sol a tendance à la sous-détection : tous les points détectés sont effectivement au sol, mais certains points au sol ne sont pas détectés, en particulier dans les zones de rupture de pente importante et convexe : crêtes, talus, quais, routes en remblai, etc. Certaines crêtes très acérées ont même été tronquées d'une cinquantaine de mètres en hauteur et ont dû faire l'objet de corrections spécifiques. L'absence d'outil fiable de contrôle et de correction a empêché de traiter ces zones de façon exhaustive.

Globalement, les écarts constatés sont de l'ordre de la précision estimée des données BD Topo. La description du terrain est bien entendu plus détaillée, du fait de la forte densité de points au sol (figure B.3.18). C'est particulièrement visible sur les thalwegs encaissés et les falaises abruptes (lorsqu'elles ont pu être correctement corrigées).

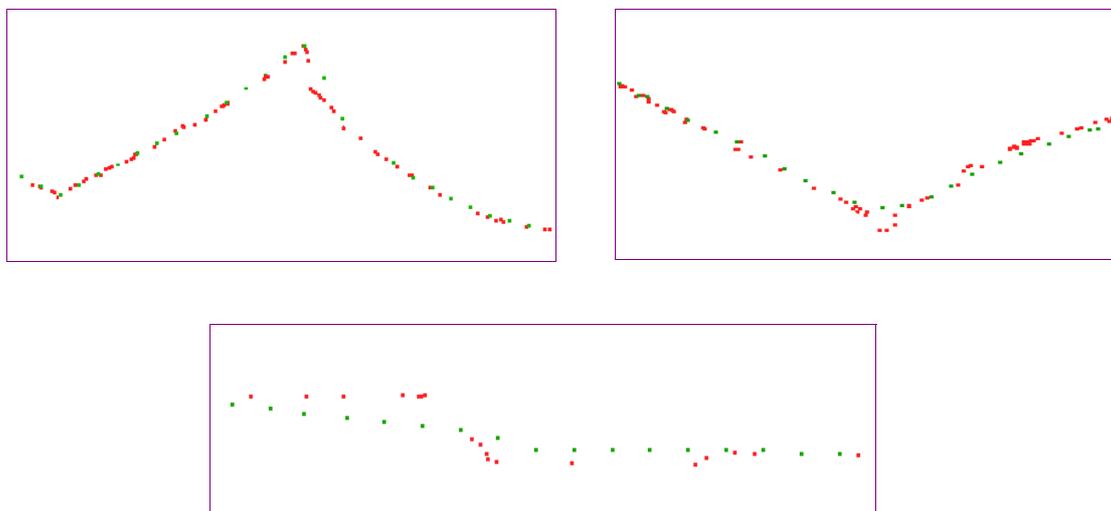


figure B.3.18 : quelques profils comparant MNT laser (rouge) et MNT BD Topo (vert)

Remarque sur la cohérence entre bandes

Le chantier du Vaucluse comprenait cinq bandes (l'une d'elles a même été volée deux fois). Si globalement et compte-tenu des objectifs attendus en terme de précision (métrique), la cohérence entre bandes semble satisfaisante, un examen plus approfondi a mis en évidence des écarts altimétriques sur les inter-bandes. Ces écarts (que l'on ne peut mesurer de façon fiable qu'en terrain dégagé et relativement plat) sont en général de l'ordre de 20 à 30 cm et jusqu'à 60 cm. Ils semblent relativement constants sur toute la longueur des inter-bandes. Il semble qu'il s'agisse d'un systématisme en roulis (rotation autour de l'axe de vol). Ce défaut devrait en principe être compensé lors de la phase de calibration.

Quoiqu'il en soit, cela met en avant la nécessité de disposer d'un processus logiciel d'ajustement des bandes entre elles, à partir de points de liaison et éventuellement de points d'appui. Il faut remarquer que les sociétés privées qui réalisent un tel ajustement utilisent des logiciels « maison » et que ce sujet fait encore l'objet de nombreuses recherches [LATYPOV 02].

Rendements et coûts

Acquisition

Dans les conditions du test, le rendement à l'acquisition est de 370 km²/h. Si l'on compte 5 heures de vol utile, on couvre 1 850 km² par jour, soit 55 000 km² par an, sur la base de 30 jours de vol. En comptant le coût de vol, l'amortissement du laser et la maintenance, on arrive à 32 400 € par jour de vol, soit environ 17,4 €/km².

Post-traitements

D'après l'expérience des vols test, on peut estimer qu'un jour de vol correspond à deux jours de calcul (trajectographie et nuage de points). A cela s'ajoutent une semaine de classification semi-automatique et quatre semaines de corrections interactives sur stations de photogrammétrie numérique. Le coût des post-traitements est donc d'environ 4,60 €/km².

Bilan

Un système ALS 40 pourrait donc permettre de produire 55 000 km² de MNT par an, pour environ 22 €/km². On ne compte pas ici les coûts liés à la formation du personnel, à l'ingénierie nécessaire pour la mise en production, aux frais généraux, etc.

Prix des prestataires

Les Pays-Bas ont fait réaliser entre 2000 et 2002 leur nouveau modèle numérique de terrain (nommé AHN, un point pour 16 m², EMQ en Z 15 cm) pour une somme totale d'environ 11 M€, soit 450 €/km². Les sociétés contactées au moment de la préparation du vol test nous ont fourni des devis entre 276 €/km² et 750 €/km² pour une zone peu étendue (50 km²).

Ces chiffres sont cependant difficilement comparables avec l'estimation réalisée. Ils ne concernent, en effet, que des chantiers réalisés à basse altitude, avec une densité de points et une précision finale très supérieures à ce que l'on souhaite obtenir dans la cadre de la réfection de la BD Alti.

Comparaison avec d'autres techniques

À titre indicatif, en restitution altimétrique BD Topo, les rendements atteints sont de l'ordre de 40 à 100 ha/h en montagne selon le type de relief, soit entre 45 et 112 €/km². Les processus de corrélation automatique sur images aériennes pourraient atteindre des coûts comparables à ceux du laser pour les phases de calcul, par contre les contrôles et corrections interactives sont sensiblement plus lourdes, d'une part, du fait de la plus faible densité de points, et d'autre part, par le comportement moins favorable sur les zones boisées.

Bilan

La précision théorique du système annoncée par son constructeur semble assez réaliste : les écarts-types aux points de contrôle (après calibration) obtenus avec une hauteur de vol de 3 000 m (contrôle de la calibration sur Creil et points de contrôle sur le Vaucluse) donnent un écart-type altimétrique inférieur à 25 cm.

Les comparaisons effectuées avec les données BD Topo disponibles montrent des écarts moyens entre les deux types de données de l'ordre de la précision attendue du MNT BD Topo. Les écarts les plus forts sont dus soit à des thalwegs mieux marqués dans le MNT laser, en particulier en zone boisée, soit à des défauts de filtrage des points laser, au niveau de rupture de pentes marquées. Ces constatations renforcent la nécessité de disposer d'outils de corrections interactives.

Les performances atteintes sont nettement supérieures à celles que l'on peut obtenir par photogrammétrie sur des zones de montagnes comparables. Le laser aéroporté apparaît donc comme une technique adaptée à la constitution d'une base de données altimétrique nationale, tant du point de vue de la qualité du MNT produit que des rendements et des coûts de production, à condition d'adapter les caractéristiques d'acquisition et les post-traitements aux spécifications.

En effet, par soucis de productivité et d'adéquation à nos besoins en précision, il convient de choisir une hauteur de vol d'au moins 3 000 m et un angle de balayage d'au moins 45° permettant de réduire le nombre d'axes de vol. Il faudra également utiliser au maximum l'automatisation de l'élimination du sursol et limiter les corrections interactives pour bénéficier pleinement des avantages de cette technique par rapport à la photogrammétrie traditionnelle ou numérique.

La recherche en matière de laser aéroporté

Frédéric Bretar

Introduction

Les travaux de recherche concernant le laser aéroporté sont inscrits dans une thèse effectuée au laboratoire MATIS en collaboration avec l'École Nationale Supérieure des Télécommunications de Paris et qui s'intitule : « Étude du couplage photogrammétrie-LIDAR aéroporté ». Compte tenu des performances mentionnées précédemment, le laser aéroporté est susceptible de faire partie, à terme, des techniques de base des sciences géographiques, au même titre que la photogrammétrie.

Les compétences et l'expérience acquises au sein de l'Institut Géographique National dans le domaine de la photogrammétrie sont capitales dans le cycle de production de toute carte. Loin d'entrer en concurrence avec cette technique, l'information fournie par les systèmes laser compléterait de manière significative les imperfections contingentes aux méthodes automatiques mises en œuvre dans les processus de fabrication de MNT, par exemple.

Cette thèse a pour but d'évaluer les performances du couplage des données altimétriques précises du laser et des données provenant de la photogrammétrie, fournissant à terme une géométrie 3-D « parfaite », combinée à l'information radiométrique correspondante, permettant ainsi une identification visuelle de la scène en question. Ce travail s'attachera essentiellement en premier lieu à estimer et à modéliser le décalage des données LIDAR par rapport à la mise en place photogrammétrique. Puis dans une seconde période, une fois le référencement effectué, une pléiade d'applications pourra être développée, de l'utilisation des intensités laser dans un contexte qui nous est propre aux améliorations des algorithmes de discrimination sol/sur-sol.

Estimation et correction du décalage des données LIDAR

Les données laser se présentent sous la forme d'un nuage de points 3-D géo-référencé. Dans un souci de cohérence globale et de maximisation de la précision finale, nous voudrions utiliser ces données brutes comme entrée de nos calculs. Le caractère primaire de ces données n'est cependant que supposé. En effet, le traitement consistant à coupler les données GPS embarqué avec la station fixe, les données angulaires des mesures inertielles et les temps de réponse du système laser peuvent mener à l'accumulation de certaines erreurs, d'un certain biais planimétrique et/ou altimétrique.

Il ne s'agit pas dans cette thèse de refaire une chaîne complète de calcul de la position des points 3-D du nuage. Les calculs très complexes de couplage Inertie-GPS restent la priorité et la légitimité des fournisseurs de données laser. Il s'agit plutôt d'estimer les erreurs *a posteriori* de ce pré-traitement, pour corriger de manière définitive le caractère absolu du nuage. Ce nuage de points n'est pas échantillonné sur une grille régulière; cette disposition est entièrement liée à la géométrie d'acquisition, ce qui, pour nos données test d'Amiens, fournit une inégale densité de points dans les directions transversales et parallèles au vol.

Nous disposons d'un MNS interpolé à partir des points bruts, ré-échantillonné à une résolution de 50 cm. Ce MNS, en plus des erreurs liées au référencement, subit de nombreuses opérations d'interpolation et de lissage qui nous sont inconnues, influençant directement la précision finale. Difficilement utilisable pour quantifier de manière précise les erreurs de positionnement, le MNS laser permet néanmoins de constater les décalages vis-à-vis d'une référence, ici le TRAPU rasterisé. La figure B.3.19, ci-dessous, représente une vue tri-dimensionnelle du MNS laser interpolé (en vert), et la reconstitution 3-D du modèle TRAPU correspondant (en rouge). On constate nettement que le MNS laser est décalé par rapport au TRAPU dans les trois directions de l'espace. Ces erreurs de superposition, sans parler de l'interpolation, sont pourtant liées à des paramètres physiques en théorie mesurables.

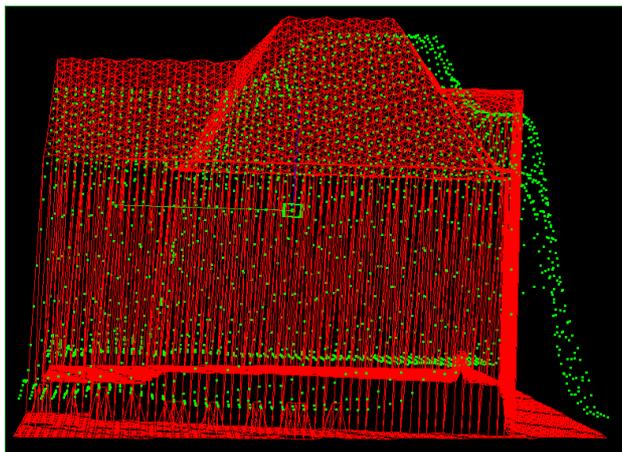


figure B.3.19

Représentation 3-D du décalage entre les données TRAPU (en rouge) et le MNS laser interpolé (en vert).

Il s'agit de multiples imprécisions dans la mesure, ainsi que de l'influence des conditions extérieures :

- erreurs internes au système laser ;
- atmosphère non stable au moment du survol ;
- surface du sol très hétérogène (végétation, plans d'eau, objets mobiles) ;
- caractéristiques du terrain (rugosité, pente, qualité des réflecteurs) ;
- mauvaise trajectoire GPS ;
- dérives au niveau de la centrale inertielle ;

- problèmes lors de l'intégration ;
- ...

Nous voudrions modéliser de manière précise les décalages à l'aide d'une transformation géométrique simple, la composée d'une translation et d'une rotation. Même si nous pouvons estimer une mesure du décalage entre le nuage de point et notre référence (TRAPU), cette dernière ne sera que très rarement disponible. C'est alors par l'intermédiaire de la photogrammétrie, dont nous estimons la précision adéquate à nos besoins, que nous allons mesurer ces erreurs.

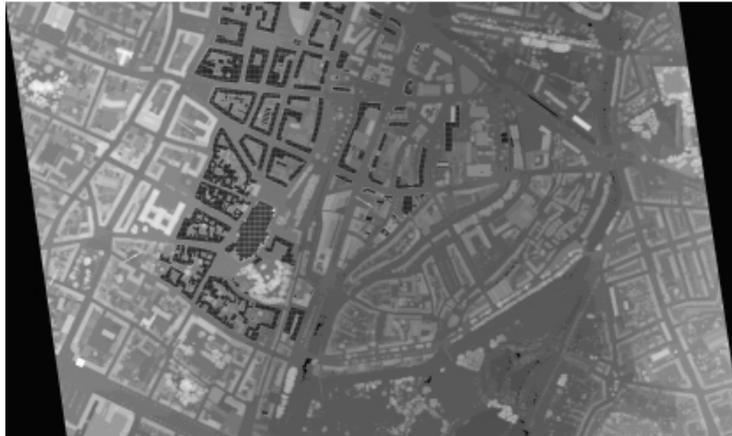


figure B.3.20

*MNS laser du centre ville d'Amiens.
Les bâtiments noirs représentent la superposition du TRAPU au MNS laser.*

Il importe que nos deux systèmes de mesure aient une parfaite cohérence spatiale. Toute la difficulté du problème vient du fait que nous comparons de données de nature différente (image dense et nuage de points clairsemés). Les homologues des points laser ne sont pas connus sur l'image.

À partir d'un (ou plusieurs) couple(s) stéréoscopiques, deux techniques sont envisagées :

- dans l'espace objet : mesures de distances entre le MNS laser et le MNS de (multi-)corrélation. Deux approches pourront être étudiées :
 - soit on considère d'abord le nuage de points 3-D laser, puis son équivalent, le MNS raster qui en découle. Il s'agira d'établir des correspondances entre des hypothèses de points homologues, afin de trouver la meilleure transformation ;
 - soit on considère le fitting de deux nappes, le MNS laser triangulé, puis le MNS de corrélation. Il faudra dès lors définir une mesure pertinente de correspondance entre les nappes.
- dans l'espace image : mesures à partir d'un coefficient de corrélation. Il s'agit là de projeter les points laser bruts, affectés d'une certaine transformation (typiquement une translation pour commencer) dans les deux images, puis étudier les variations d'un coefficient de corrélation sur des fenêtres de chaque image du couple étudié. Le maximum de corrélation devrait correspondre à la transformation optimale permettant de passer de la géométrie laser (espace-objet) à la géométrie photogrammétrique (espace image).

L'étude de ces transformations a une vocation globale sur une bande laser. Nous voudrions étudier les variations de ces déformations afin de les relier aux paramètres physiques de l'avion, comme l'attitude du capteur au moment de la mesure. La nouveauté de ces travaux sur la zone d'Amiens (figure B.3.20) ne nous permet malheureusement pas encore de conclure sur l'aspect quantitatif de ces déformations. Ainsi, si nos hypothèses se confirment, la photogrammétrie permettra de recalibrer le nuage de points laser sur une référence commune au chantier. Le couplage envisagé semble donc pertinent dans la mesure où toute estimation extérieure de la précision géographique du laser n'est pas facilement quantifiable. Une fois recalibré, nous disposerons d'une géométrie 3-D de base ouverte à de nombreuses applications. De son côté, le laser apporte une densité de points fiables bien supérieure à celle obtenue par des méthodes photogrammétriques. La précision altimétrique reste meilleure du fait même du moyen de mesure (un temps de parcours), alors que les MNS issus de la photogrammétrie sont le résultat d'une corrélation, toujours sensible aux artefacts radiométriques et géométriques.

Perspectives

Un intérêt certain du laser réside dans son pouvoir de séparation sol/sur-sol. En effet, nous avons vu qu'un rayon laser pouvait pénétrer tout ou partie de la couverture végétale d'un terrain, permettant l'enregistrement de plusieurs réflexions d'une même impulsion laser.

Le dernier écho de chaque impulsion représente en général un point sur le sol. Ces échos multiples (principalement deux, les autres étant de trop faible intensité) fournissent alors une carte du sol et du sur-sol. Les algorithmes de discrimination sol/sur-sol ne sont pas encore assez génériques pour qu'une solution globale soit couramment utilisée. L'usage d'images aériennes pourrait être d'une aide précieuse dans la séparation des zones contenant de la végétation de celles qui en sont vierges. Il serait aussi opportun d'utiliser la réflectance de l'impulsion laser, cette information étant assez peu employée [MAAS 01]. Porteuse d'une information très spécifique et ayant un spectre étroit, nous regarderons s'il est possible de mettre en correspondance des éléments reconnus dans des images aériennes et ceux détectés dans des images d'intensité.

Conclusion

Les systèmes laser présentent les avantages suivants :

- *forte précision altimétrique* : les systèmes laser reposent sur une mesure de distance extrêmement précise et permettent donc d'obtenir des données altimétriques fiables ;
- *mesures indépendantes de l'éclairement* : le laser est un système actif qui peut être utilisé de nuit ou par temps sombre, ce qui offre beaucoup plus de possibilités de vol qu'en imagerie optique. En revanche il est déconseillé de voler par grand vent pour ne pas perturber la stabilité du vecteur et du capteur ;
- *utilisation des échos multiples* en milieu urbain et surtout en milieu forestier (bonne pénétration dans la végétation) ;
- *rapidité de préparation, d'acquisition et de traitement* : les données sont immédiatement numérisées lors du vol puis elles sont analysées au sol. Cependant il est fortement conseillé de réaliser un travail s'apparentant à un travail de stéréo-préparation même sommaire.

D'une manière générale, les points critiques de la technologie laser sont les suivants :

- en l'absence de processus d'ajustement des bandes, toute la qualité géométrique est issue de l'emploi combiné du DGPS et de l'INS. Les moyens de contrôle sont donc limités. En cas de problème sur un élément (station de référence au sol par exemple), tout le vol peut être inexploitable ;
- les données laser seules sont difficilement exploitables. Il est nécessaire de disposer d'outils de contrôle et de corrections des données laser s'appuyant sur des données externes (photogrammétrie numérique en générale) ;
- de plus, on peut noter une répartition souvent inégale des points provenant à la fois de la nature du balayage et du recouvrement (certaines zones sont comprises dans deux bandes, d'autres dans une seule).

Les vols sur Amiens, Paris, la forêt de Pagnotte et les dentelles de Montmirail ont montré les capacités élevées du laser dans des milieux variés et dans des conditions de vol très différentes. Les études de coût sont également prometteuses. Quant au couplage avec les systèmes imageurs, les recherches en cours sont destinées à mettre en évidence la complémentarité des deux systèmes afin de capitaliser les savoir-faire de l'IGN en matière de photogrammétrie.

Références

- [CASELLA 01] V. Casella : *Accuracy Assessment of Laser Scanning Data : a case study*, 3rd International Symposium on Mobile Mapping Technology, Cairo, Egypt, 6-10 January 2001.
- [HAALA, BRENNER 99] N. Haala and Brenner : *Extraction of buildings and trees in urban environments*, ISPRS, Vol. 54, pp. 130-137, 1999.
- [HAUGERUD, HARDING 01] R.A. Haugerud and Harding : *Some algorithms for virtual deforestation of lidar topographic survey data*, ISPRS Workshop on Airborne Laserscanning, Annapolis, Octobre 2001.
- [IRISH, LILLYCROP 99] J.L. Irish and W.J. Lillycrop : *Scanning laser mapping of the coastal zone : the SHOALS system*, ISPRS, Vol. 54, pp. 123-129, 1999.
- [KRAUS, PFEIFER 01] K. Kraus, N. Pfeifer : *Advanced DTM generation from LIDAR data*, ISPRS Workshop on Airborne Laserscanning, Annapolis, octobre 2001.
- [LATYPOV 02] D. Latypov : *Estimating relative lidar accuracy information from overlapping flight lines*, ISPRS, Vol. 56, pp. 236-245, 2002.
- [MAAS 01] G. Maas : *On the use of reflectance data for laser scanner strip adjustment*, ISPRS Workshop on Airborne Laserscanning, Annapolis, Octobre 2001.
- [VOSSSELMAN, SUVEG 01] G. Vosselman and I. Suveg : *Map Based Building Reconstruction from Laser Data and Images*, Ascona 2001, juin 2001.

Publication

- [JOINVILLE et al 02] O. de Joinville, B. Ferrand & M. Roux : *Levé Laser aéroporté : état de l'art, évaluation, traitement des données et comparaison avec des systèmes imageurs*, in Bulletin n°166 de la SFPT, pp. 72-81, laboratoire MATIS, IGN-SR 02-009-C-ODJ, 2002.

B.4 Un canal proche infrarouge pour la caméra numérique de l'IGN

Jean-Philippe Souchon & Christian Thom

Introduction

L'acquisition d'images du territoire dans plusieurs bandes spectrales, dont le canal proche infrarouge, n'est pas une nouveauté. Depuis des années, des satellites d'observation de la Terre acquièrent à l'aide de barrettes DTC des images numériques, qui après traitement et registration, peuvent être utilisées plan par plan, en mode vraies couleurs ou fausses couleurs. Les émulsions infrarouges ont également souvent été utilisées dans les chambres de prises de vues argentiques du Service des Activités Aériennes (SAA) de l'IGN.

Notre travail a consisté à réaliser une caméra numérique multi-canaux basée sur l'utilisation de capteurs DTC matriciels, destinée à être embarquée sur vecteur aérien et capable d'acquérir les canaux rouge, vert, bleu nécessaires à la synthèse de la couleur, mais également le canal proche infrarouge. Une fois cette caméra mise au point, une mission d'essai a été réalisée sur un département entier (le Tarn). Ceci nous a permis de mettre au point les outils nécessaires à la visualisation d'images quatre canaux et de peaufiner l'algorithme de superposition des plans colorés qui avait déjà été mis au point pour les images RVB. Cet article porte sur le concept de cet instrument et sur les résultats qu'il nous a permis d'obtenir.

Historique

En juin 2000, un premier prototype de caméra multi-canaux volait avec succès sur le Bassin d'Arcachon [LE NINDRE et al 00]. L'instrument était composé de trois caméras numériques équipées de capteurs noir et blanc 3 000 x 2 000 et munies de filtres colorés rouge, vert et bleu. Cette mission validait le concept de caméra multi-canaux basée sur la synchronisation de plusieurs têtes de caméras.

L'étape suivante a consisté au passage des têtes de caméras au format 4 000 x 4 000 pixels (mission sur la Communauté Urbaine de Bordeaux (CUB), en février 2001, toujours en mode RVB. La mise au point des algorithmes de superposition des canaux colorés a permis de détecter un défaut de qualité optique significatif des filtres colorés qui nous avaient été prêtés. C'est donc avec de nouveaux filtres que la configuration à trois têtes de caméras a été validée sur le Luxembourg en 2001 et que les algorithmes de superposition des canaux RVB ont été validés.

Au cours de l'année 2001, il fut décidé, sur demande du Ministère de l'Agriculture, que la BD Ortho de l'IGN serait acquise en quatre canaux. Durant l'été 2002, un prototype de quadri-caméra 4 000 x 4 000 a été mis en œuvre sur une mission départementale (pixel-sol de 83 cm) avec un quatrième canal : le proche infrarouge. Fin décembre 2002, un nouveau vol de ce prototype a permis une acquisition plus haute résolution (pixel-sol minimum de 33 cm).

Le canal proche infrarouge

Qu'est-ce que le proche infrarouge ?

Nous sommes entourés de rayonnements électromagnétiques dont seule une infime partie stimule nos sens. Notre œil ne perçoit en effet que la partie dite visible de ces rayonnements que certains délimitent dans l'intervalle de longueurs d'onde allant de 400 nm à 750 nm. Les rayonnements dont les longueurs d'onde sont au-delà du visible et en dessous de 10^3 μm sont dits infrarouges. La partie de l'infrarouge qui vient juste après le visible et qui ne dépasse pas 1 400 nm (à + ou - 300 nm selon les sources que l'on prend) est le proche infrarouge.

Comment acquérir ce canal ?

Toute perception de lumière est basée sur le trinôme source-filtre-capteur. Pour ce qui est de la source, l'infrarouge et donc le proche infrarouge font partie du spectre solaire : le soleil est notre source primaire. Une partie de ces rayonnements issus du soleil est absorbée par l'atmosphère mais une autre parvient jusqu'au sol terrestre. Mise à part l'eau qui absorbe totalement le rayonnement proche infrarouge qui nous intéresse, la plupart des objets au sol des sites que nous survolons en diffusent une partie (conséquente dans le cas des végétaux chlorophylliens) et se comportent ainsi comme une source secondaire. C'est cette partie ré-émise en direction de l'avion qui va nous intéresser.

Pour n'acquérir que la partie des rayonnements au dessus de 750 nm de longueur d'onde, nous utilisons un filtre passe-bas (en terme de fréquence) BW093 coupant le visible dont une courbe de transmission est donnée en figure B.4.1, page suivante. Reste le problème du capteur. Si nous plaçons notre œil derrière ce filtre 093 et que nous regardons en direction d'une scène lumineuse, nous ne percevons rien.

Notre œil n'est pas sensible aux rayonnements transmis par le filtre 093. Par contre, si nous remplaçons notre œil par un DTC, ce dernier pourra recueillir l'image des rayonnements proche infrarouge dont la longueur d'onde se situe dans l'intervalle 750 nm-1 060 nm comme le montre la courbe de sensibilité de notre capteur en figure B.4.2. Notre définition du domaine du proche infrarouge sera donc à partir de maintenant l'intervalle [750 nm-1 060 nm].

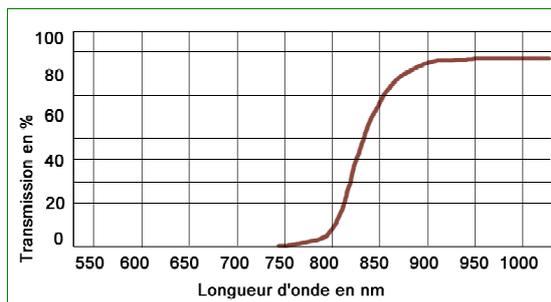


figure B.4.1 : courbe de transmission du filtre 093 utilisé

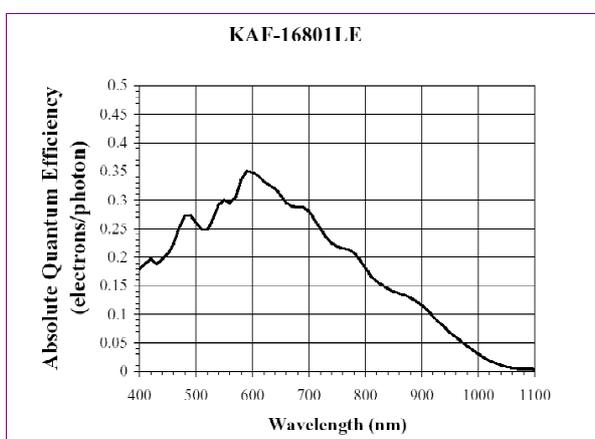


figure B.4.2 : courbe de sensibilité du capteur 4 000 x 4 000

Quel est l'intérêt de ce canal ?

Nous proposerons deux éléments de réponse :

- l'eau absorbe la quasi-totalité des rayonnements de notre domaine du proche infrarouge. Il en découle, que l'image de zones humides ou inondées sera très sombre, voire noire, dans ce canal et que ces zones seront donc plus faciles à détecter. On pourra s'en rendre compte dans les illustrations qui vont suivre au cours de cet article. La détection de zones humides ou inondées risque malheureusement de devenir d'actualité avec la multiplication des Plans d'Exposition au Risque Inondation (PERI). Dans un autre registre, on peut citer le cas d'une expérience menée par le BRGM [LE NINDRE et al 00], à l'aide d'une de nos têtes de caméra en 1999. La zone Nord du Bassin d'Arcachon a été acquise dans le canal proche infrarouge à trois reprises durant la marée montante afin de faire de la micro-topographie. On a ainsi pu délimiter l'interface terre-eau dans les images et, à l'aide d'un marégraphe qui enregistrerait le niveau de l'eau durant la mission, tracer des courbes de niveaux précises. Voici en figure B.4.3, page suivante, trois extraits d'images correspondant à la même zone du Bassin lors des passages de l'avion.

Les végétaux chlorophylliens se caractérisent par des comportements particuliers dans les grands domaines spectraux :

- dans le visible, à cause des pigments foliaires, la réflectance est globalement faible (photosynthèse oblige) avec un maximum local à 550 nm. Ceci est dû principalement aux chlorophylles a et b qui ont des pics d'absorption dans le bleu (450 nm) et dans le rouge (660 nm) ;
- dans le proche infrarouge, la quantité de rayonnement absorbée par la feuille est très faible et presque constante (10%). On assiste à un plateau de réflectance, appelé plateau proche infrarouge qui dépend essentiellement de la structure anatomique des feuilles mais aussi de l'absorption par la matière sèche ;
- dans le moyen infrarouge (1 300-2 500 nm) on a de nouveau une forte absorption du rayonnement liée à l'eau des feuilles et également à la teneur en matière sèche. Typiquement une déshydratation accroît la réflectance dans le moyen infrarouge.

On voit, par conséquent, que l'acquisition conjointe des domaines du visible et du proche infrarouge va permettre une classification fine des espèces végétales. Par exemple, on pourra distinguer les différents stades de la sénescence d'une même espèce dans le visible à cause du remplacement de la chlorophylle par des pigments bruns et dans le proche infrarouge à cause de la désorganisation de la structure interne des feuilles. Attention : ce n'est pas directement la teneur en eau des espèces végétales que l'on distingue dans notre canal proche infrarouge, tout simplement parce que l'on parle de proche et non de moyen infrarouge. Pour finir d'illustrer l'intérêt du proche infrarouge, les résultats d'une étude de l'INRA : <http://lacan.grignon.inra.fr/ressources/teledetection/vademecum.htm>, figure B.4.4, ci-dessous, montrent que si l'on dispose d'une référence de feuille verte en bonne santé, le plan proche infrarouge permettra de distinguer facilement une maladie de cette feuille (réflectance plus faible en raison de la désorganisation de sa structure) d'un simple dessèchement de cette feuille (réflectance plus forte).

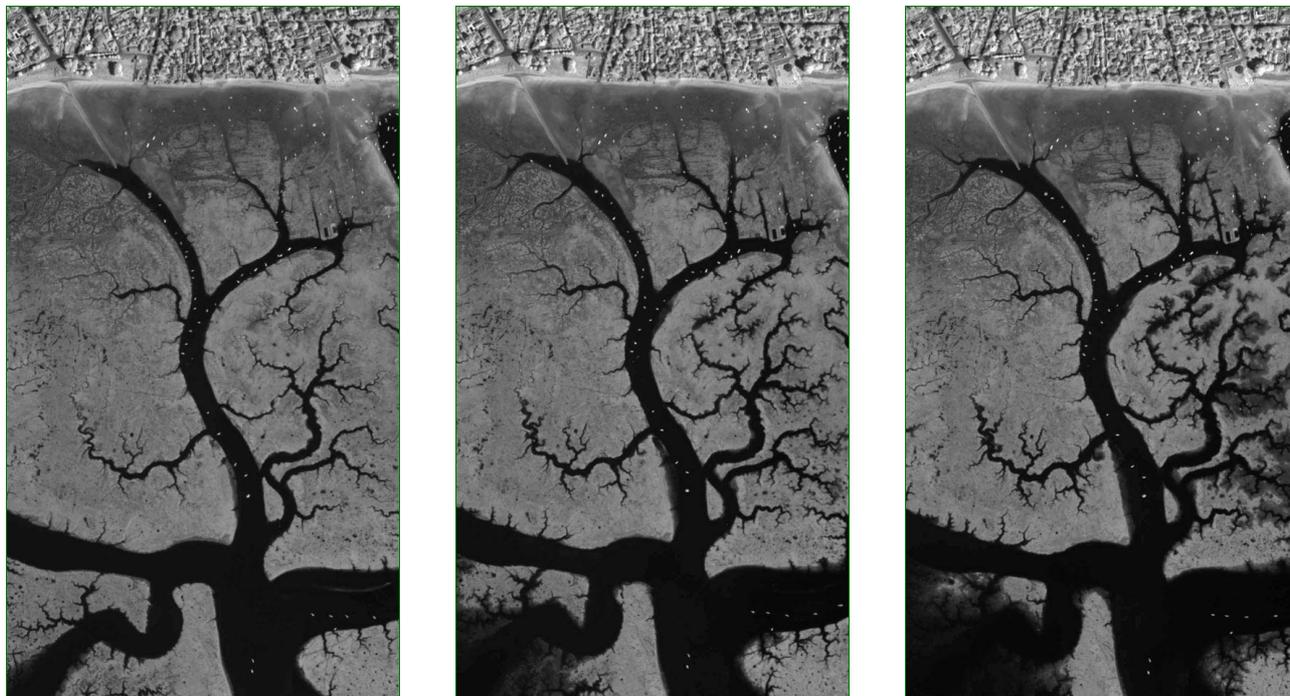


figure B.4.3

Extraits d'images acquises dans le canal proche infrarouge pour le compte du BRGM sur la zone Nord du Bassin d'Arcachon (pixel-sol : 80 cm). On voit distinctement l'eau (en noir) envahir les chenaux.

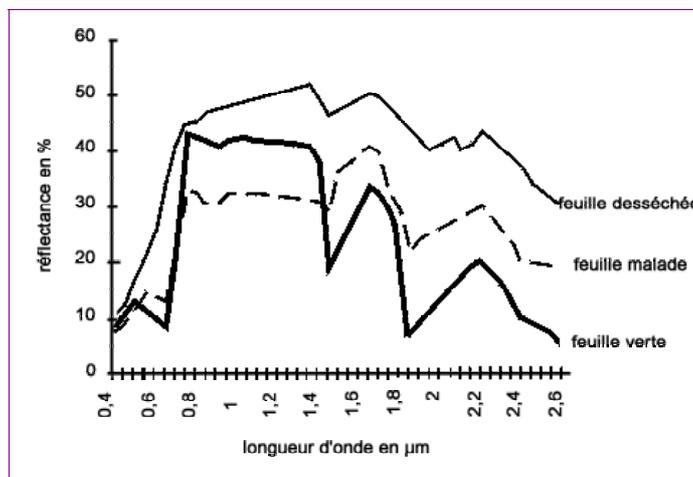


figure B.4.4

Mesures de réflectance effectuée au laboratoire de l'INRA sur des feuilles vertes, bien portantes, malades et desséchées : bien distinguer les comportements dans le proche infrarouge et le moyen infrarouge.

Comment afficher une image quadri-canal ?

- *plan par plan* : on regarde par exemple le plan proche infrarouge seul et en niveaux de gris comme cela a été fait pour la mission sur le Bassin d'Arcachon. Voir figure B.4.5a, ci-dessous pour un exemple d'acquisition de quatre plans R, V, B et PIR sur la région d'Amiens ;
- *en mode vraies couleurs* : une image couleur avec le plan rouge (respectivement vert et bleu) en rouge (respectivement en vert et bleu) en affichage RVB et le plan proche infrarouge inutilisé (figure B.4.5b) ;
- *en mode fausses couleurs* : une image couleur avec le plan proche infrarouge (respectivement rouge et vert) en rouge (respectivement en vert et bleu) en affichage RVB et le plan bleu inutilisé (figure B.4.5c.)

Ces deux derniers modes d'affichage nécessitent un ré-échantillonnage des plans afin de les rendre superposables. Nous détaillerons cet aspect du problème dans la partie superposition des canaux.



figure B.4.5 a
affichage des plans rouge (en haut, à gauche), vert (en haut à droite), bleu (en bas à gauche) et PIR (en bas à droite)



figure B.4.5 b
affichage en mode vraies couleurs



figure B.4.5 c
affichage en fausses couleurs

figure B.4.5 : extraits d'images ré-échantillonnées acquises dans la région d'Amiens

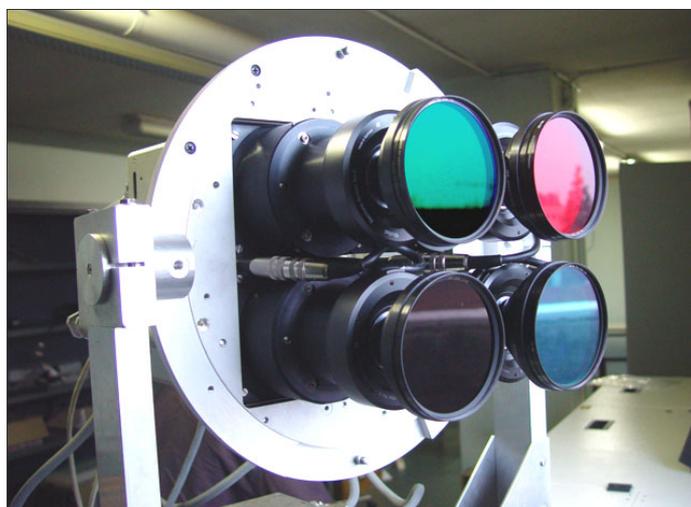


figure B.4.6 : les quatre têtes de caméras sur leur support au laboratoire

Présentation de la caméra quadri-canaux

Principales caractéristiques techniques des têtes de caméras et des racks d'acquisition associés

Notre système a déjà fait l'objet d'un article dans le bulletin d'information de la Recherche dans sa version tri-canaux de dimension 3 072 x 2 048 pixels [THOM, SOUCHON 00] et [THOM, SOUCHON 01]. Nous insisterons ici, seulement sur les changements apportés au système.

Le nouvel instrument que nous avons mis au point consiste à synchroniser quatre têtes de caméras reliées chacune à un rack d'acquisition. Chaque tête est équipée d'un capteur DTC Kodak KAF-16801LE de 4 096 x 4 096 pixels, muni d'un dispositif anti-éblouissement et plus sensible dans le bleu. Les données sont stockées sur des disques amovibles de soixante-treize Goctets, chaque rack disposant de deux emplacements pour les recevoir. Pour les missions Tarn et Amiens dont il va être question, chaque tête de caméra était équipée d'un objectif Rollei Digitar de focale 28 mm (voir figure B.4.6, page précédente).

Caractéristiques spectrales des filtres employés

Il a fallu trouver une solution de rechange sur étagère pour pallier la mauvaise qualité optique des filtres RVB qui nous avaient été fournis pour la mission sur Arcachon et qui avaient montré leurs limites lors de la mission sur la CUB en février 2001. Pour chaque canal, hormis le canal proche infrarouge, nous avons retenu la combinaison de deux filtres fabriqués à partir de verre Schott.

Les combinaisons sont les suivantes : pour le vert, VG9+BG18, pour le bleu BG12+BG18 et pour le rouge OG590 et un filtre interférentiel coupant le proche infrarouge. Le verre Schott employé pour la fabrication du filtre PIR 093 ont la courbe de transmission est donnée en figure B.4.1, est le RG830. On donne en figure B.4.7, ci-dessous, les courbes de transmission des combinaisons de filtres retenues. On voit qu'une balance des blancs est nécessaire pour profiter de la dynamique de chaque caméra grâce à des coefficients d'allongement des temps de pose.

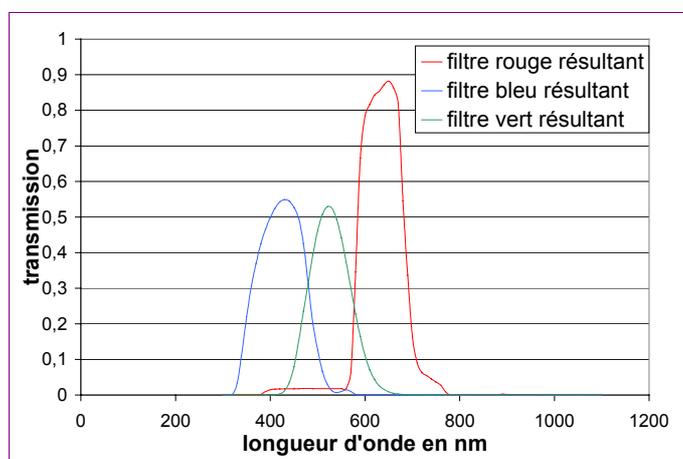


figure B.4.7

Courbes de transmission des filtres résultants des combinaisons de verre Schott que nous avons choisies.

Superposition des canaux

La méthode retenue et les différentes étapes de mise au point de l'algorithme de superposition

On sait que des images sans distorsion obtenues d'un même point de vue peuvent se superposer grâce à une homographie. Il en va de même en présence de distorsion, si celle-ci est identique dans les différents canaux et si les homographies sont proches de l'identité (cas de caméras à axes quasi-parallèles). Par contre, si les distorsions des optiques sont très différentes d'un canal à l'autre il est nécessaire d'en tenir compte.

L'élaboration de notre algorithme de superposition des plans colorés s'est faite en deux étapes.

Détermination de l'homographie

Dans un premier temps, on fait l'hypothèse que les images ont la même distorsion dans chaque canal. Cette hypothèse n'est pas trop optimiste dans le cas de missions utilisant de longues focales (50 ou 60 mm) ou encore des caméras dotées de plus petits capteurs. La mission sur le Bassin d'Arcachon répond à ces critères puisqu'on utilise des objectifs de focale 50 mm avec des capteurs de 3 072 par 2 048 pixels. Les écarts de distorsion en bord de champ entre les canaux colorés ne sont pas significatifs. On calcule l'homographie permettant de superposer les plans rouge et bleu sur le plan de référence vert. Pour cela, on mesure par corrélation les vecteurs déplacement entre deux images sur une grille de points régulièrement espacés (ce nombre de points est paramétrable et est de vingt-cinq minimum).

La corrélation peut se faire sur des grosses vignettes puisque les images sont quasi-identiques : une valeur de soixante-quatre pixels de côté a été retenue. On détermine ensuite par moindres carrés la meilleure homographie produisant ces déplacements. Pour une utilisation en aval des images couleur obtenues, il faudra donc utiliser le certificat de calibration établi pour le canal de référence (ici, le vert).

Prise en compte de la distorsion

Dans le cas d'images acquises avec des têtes de caméras équipées de capteurs 4 096 x 4 096 pixels et munies d'objectifs de focale plus courte (tel que le 28 mm), une prise en compte de la distorsion s'impose (voir figure B.4.8, ci-dessous). L'homographie est alors calculée sur les plans colorés corrigés de leur distorsion. Les paramètres de distorsion figurent dans un fichier descriptif de caméra dans lequel on trouve les coordonnées du point principal de symétrie (centre de la distorsion) et les coefficients en R3, R5 et R7 du polynôme de distorsion. On a retenu un modèle radial de distorsion calculé à partir de pointés réalisés sur les images d'un polygone de calibration de plus de quatre-vingt cibles se trouvant sur le site de Saint-Mandé. Si on regarde sur la figure B.4.9 (ci-dessous), le tracé des polynômes de distorsion trouvés pour les quatre plans rouge, vert, bleu et proche infrarouge, on voit nettement ce qui peut expliquer de tels décalages à 2 900 pixels du centre de l'image.

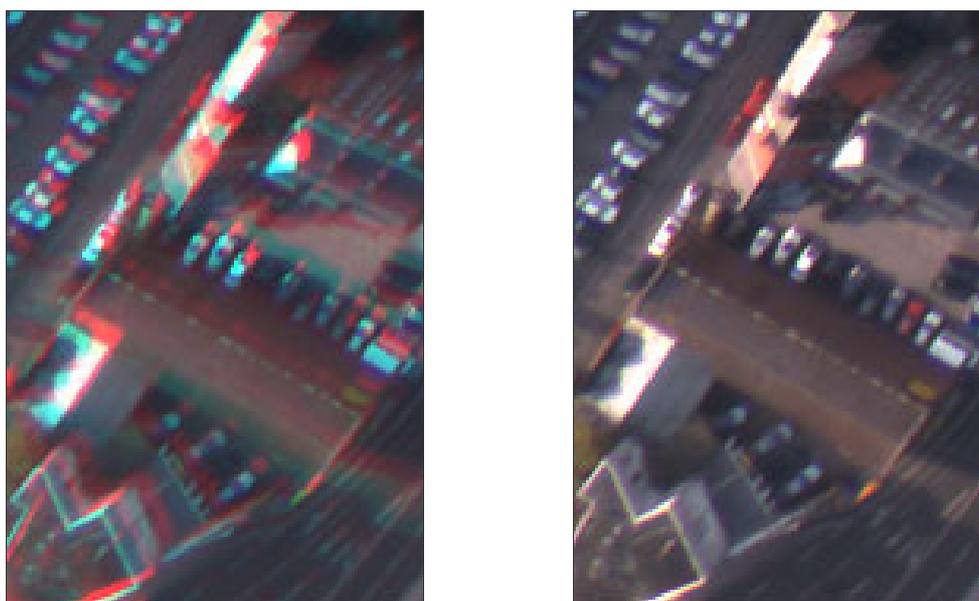


figure B.4.8.

Extrait du coin inférieur gauche d'une image 4k x 4k acquise sur Amiens, fin décembre 2002. À gauche (respectivement à droite) résultat de la superposition des plans RVB sans (respectivement avec) prise en compte des paramètres de distorsion.

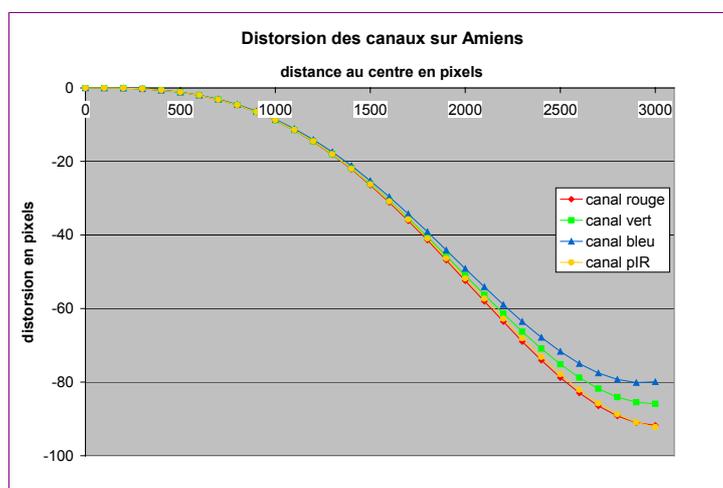


figure B.4.9

Tracé des polynômes de distorsion trouvés à l'issue de l'étalonnage géométrique des quatre caméras ayant volé sur Amiens, en décembre 2002.

Les problèmes rencontrés avec le canal proche infrarouge

Les optiques du commerce que nous utilisons avec nos caméras ne sont pas optimisées pour le domaine proche infrarouge. Par conséquent, il est délicat voire impossible d'obtenir une image parfaitement nette en bord de champ. D'autre part, le corrélateur fonctionnait bien entre les plans visibles dans la plupart des cas de figures avec des coefficients de corrélation supérieur à 0,8. Mais de trop grandes différences de contenu du canal proche infrarouge pouvant amener jusqu'à des cas d'inversion de contraste (figures B.4.10 et B.4.11, ci-dessous) l'ont mis en échec avec des coefficients de corrélation souvent inférieurs à 0,1. Il a donc fallu modifier le processus de recalage en passant par l'intermédiaire d'images de gradients (figure B.4.12, page suivante).

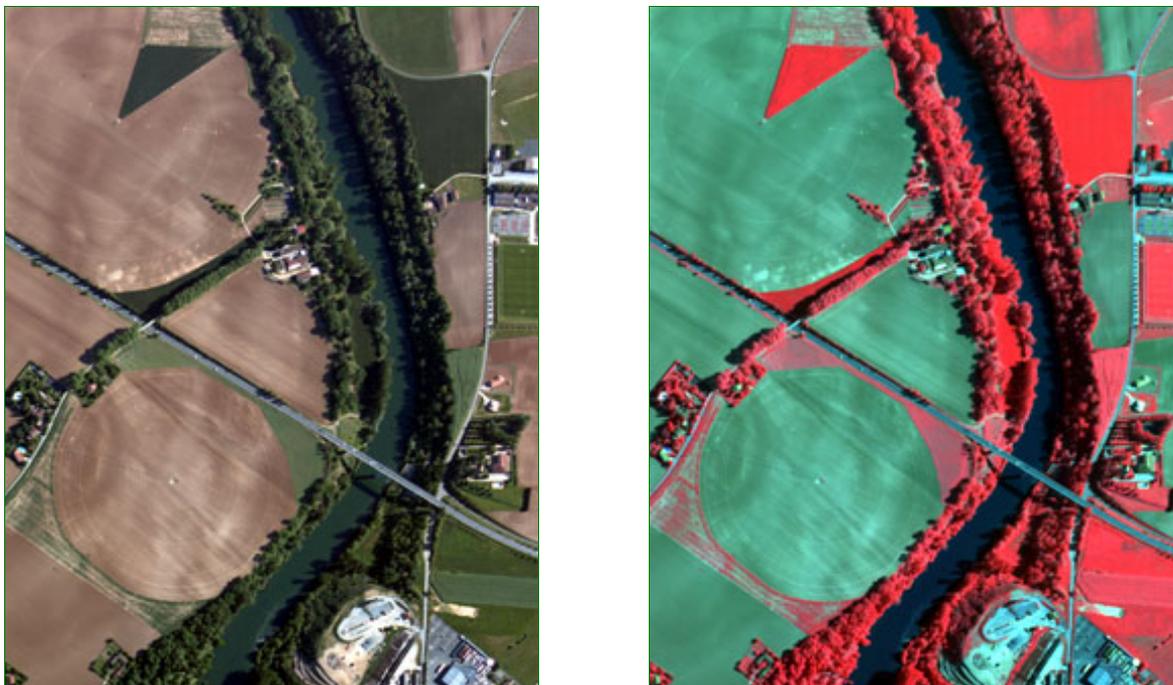


figure B.4.10

Extrait d'image acquise sur le département du Tarn en affichage vraies couleurs à gauche et fausses couleurs infrarouge à droite (pixel-sol de 80 cm sous-échantillonné par quatre).

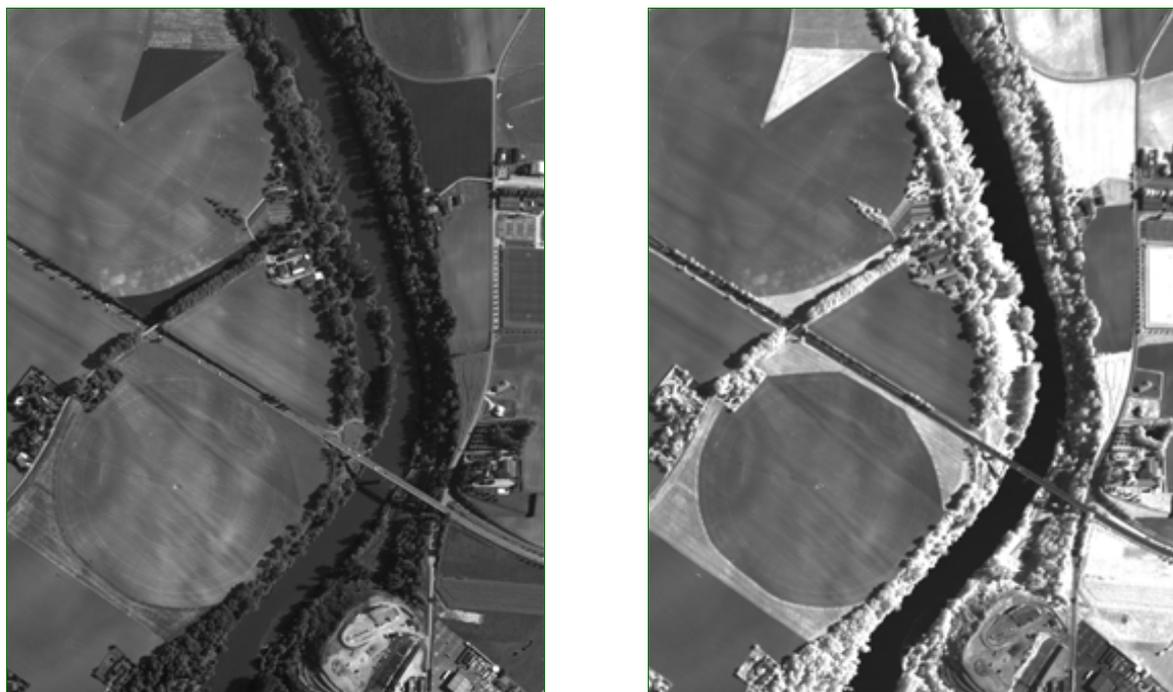


figure B.4.11

Le même extrait d'image acquise sur le département du Tarn dans les plans vert (à gauche) et proche infrarouge (à droite). Noter les inversions de contraste dans les zones à fort couvert végétal.

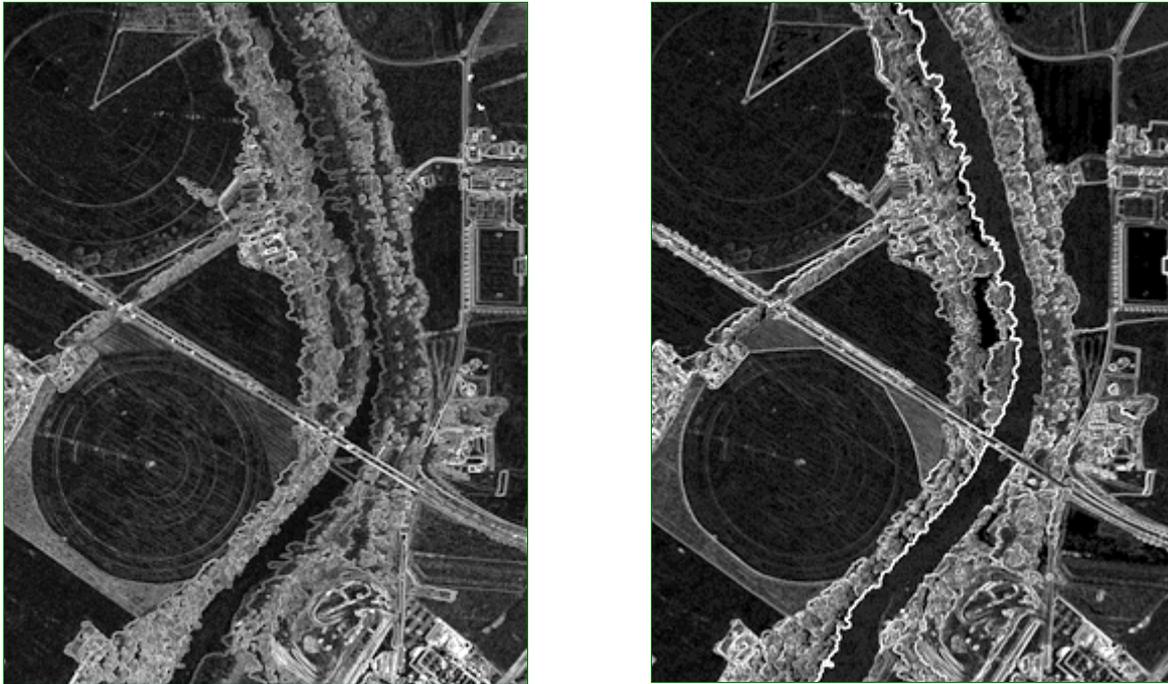


figure B.4.12

*Les images de gradients des images de la figure B.4.11.
Noter la plus grande similitude entre ces deux images par rapport à celles de la figure B.4.11.*

Bien que les critères d'acceptation des points de corrélation soient plus souples pour le plan proche infrarouge que pour les autres plans, on peut donner une idée des résultats du calcul de l'homographie pour une image du Tarn :

- pour le plan proche infrarouge, 30% des points de corrélation ont été retenus. Les résidus moyens sont de 0,35 pixel en X et en Y et les résidus maximaux sont de 0,63 pixel en X et 0,55 pixel en Y ;
- pour les plans rouge et bleu, 90% des points ont été retenus. Les résidus moyens sont de 0,27 pixel en X et 0,19 pixel en Y tandis que les résidus maximaux sont de 0,66 pixel en X et 0,56 pixel en Y.

Les domaines d'application des images quatre canaux

Tous les domaines bien connus de la télédétection nous sont maintenant accessibles.

On peut citer par exemple :

- dans le cadre du développement durable, la gestion des ressources agricoles et forestières : les prises de vues départementales qui seront réalisées dans un proche avenir seront particulièrement adaptées à cette application ;
- la gestion des zones littorales comme l'a montré la mission pilote sur le Bassin d'Arcachon [LE NINDRE et al 00] ;
- le recensement et la cartographie des zones humides par un organisme tel que les agences de l'Eau.
- ...

L'apport de la très haute résolution géométrique alliée à une bonne résolution radiométrique est trop récent pour nous permettre de citer exhaustivement toutes les applications qui en profiteront mais on peut d'ores et déjà penser à :

- l'extraction automatique des zones bâties lors de l'élaboration de bases de données urbaines. La distinction des zones végétales du sursol des zones construites (figure B.4.13, page suivante) sera facilitée par le plan proche infrarouge ;
- l'aide à l'élaboration des PERI et l'aide au dédommagement des sinistrés des inondations.
- ...

Amélioration possible

La superposition des plans colorés a révélé les limites du modèle de distorsion radial retenu jusqu'ici. En effet, il reste des zones marginales de l'image où la superposition n'est pas parfaite, ce qui cause des liserés colorés sur les bords contrastés. Une cause possible de ce phénomène, outre l'imperfection des optiques, serait les défauts de planéité du capteur.

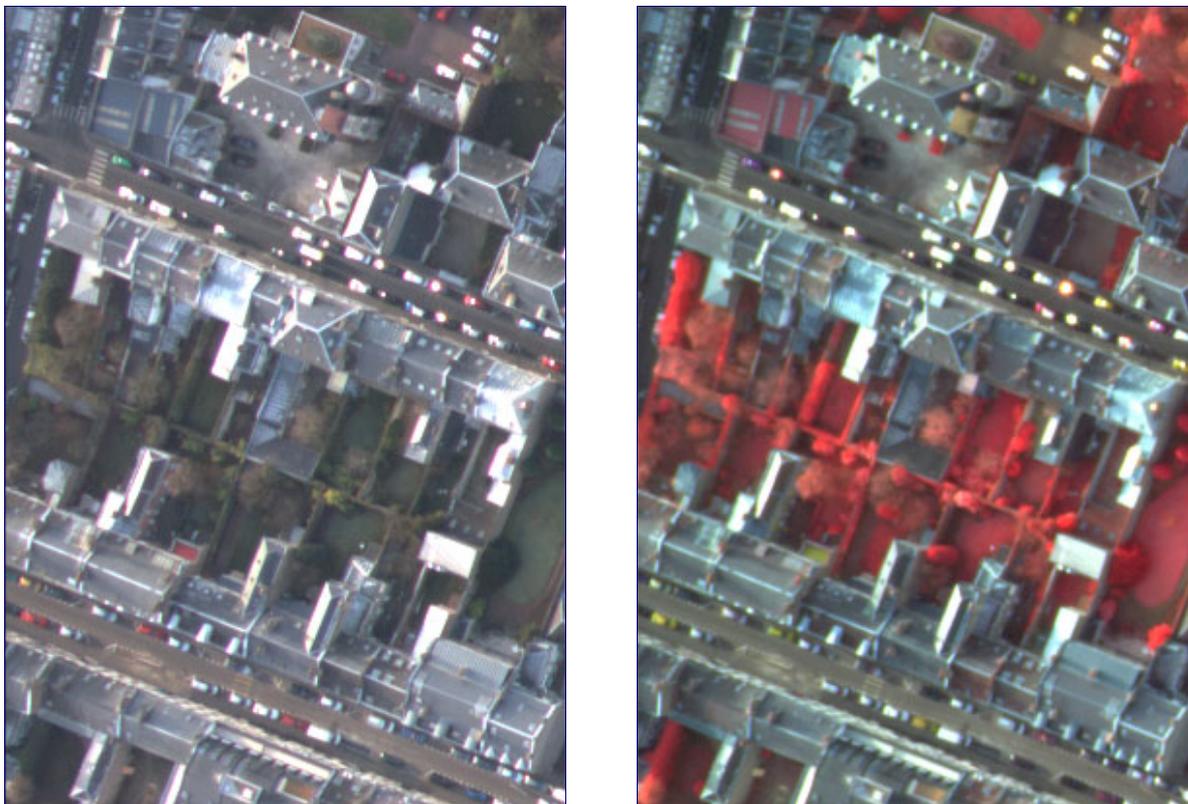


figure B.4.13

Extrait d'une image acquise sur Amiens au pixel-sol de 33 cm.

Pour résoudre ce problème, il faut adopter un modèle de distorsion plus complexe incluant notamment des termes non radiaux. Le processus actuel d'étalonnage, basé sur le pointé de cibles dans les images faites d'un polygone, ne procure pas un semis de points de mesures assez dense pour permettre une modélisation ayant plus de degrés de liberté. Une nouvelle méthode d'étalonnage est actuellement à l'étude au laboratoire MATIS. Il faudra alors revoir la chaîne de traitements des données pour tenir compte de ce nouveau modèle de distorsion.

Les images livrées aux services clients seront sans doute ré-échantillonnées pour enlever toute distorsion. La précision géométrique des mesures qui pourront y être effectuées (aérotriangulation et stéréo-restitution par exemple) s'en verra encore améliorée.

Conclusion

Alors qu'arrivent sur le marché les images des premiers satellites haute résolution, l'ajout d'une voie proche infrarouge à notre système de caméra multi-canaux conforte ce dernier dans sa position de bon complément au vecteur satellital. Cette complémentarité est vraie tant dans le domaine de la résolution géométrique que dans le domaine de la résolution radiométrique. Elle devrait se concrétiser avec l'utilisation des images satellites haute résolution pour les applications à petite et moyenne échelle et par celle des images de nos caméras pour les applications à grande échelle où une résolution géométrique décimétrique est attendue.

D'une manière plus générale, nos images aériennes ouvrent la porte à une télédétection à très haute résolution géométrique qui pourrait se trouver de nouveaux champs d'application. Pour cela, des efforts restent à fournir en matière de développements pour les services de production afin de s'adapter à ce nouveau produit, ainsi qu'au niveau commercial pour leur promotion.

Publications

[LE NINDRE et al 00] Y.M. Le Nindre, Ch. Thom & J.-Ph. Souchon : *Terra Symphonie - Aménagement intégré du Bassin d'Arcachon. Etude n° 5 : Mise au point d'un outil de surveillance et d'aide à la décision en matière d'exhaussement des fonds du Bassin d'Arcachon*, rapport BRGM/RP-50578-FR, 67 pages, 22 figures, 3 tableaux, 1 annexe, laboratoire OEMI, IGN-SR-00-009-L-RAP-CT, 2000.

Voir : <http://lacan.grignon.inra.fr/ressources/teledetection/vademecum.htm>.

[THOM, SOUCHON 00] Ch. 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-CT, 2000.

[THOM, SOUCHON 01] Ch. Thom & J.-Ph. Souchon : *Multi-Head Digital Camera Systems*, in GIM International, vol. 15 #5, mai 2001, pp. 34-37, GITC Publication Eds, laboratoire OEMI, IGN-SR-01-006-L-ART-CT, 2001.

B.5 Développement d'un lidar Raman pour le sondage de la vapeur d'eau et la correction des délais troposphériques en GPS

Olivier Bock (1), Jérôme Tarniewicz (1), Yann Morille (2,3), Jacques Pelon (1) & Christian Thom (2)

(1) Service d'Aéronomie/CNRS, Université Paris VI, Paris, France

(2) Institut Géographique National, Saint-Mandé, France

(3) Météo France, CNRM, Toulouse, France

Olivier.Bock@aero.jussieu.fr, Ph: +33 (0)1 44 27 47 73 / Fax: +33 (0)1 44 27 37 76

Contexte

Depuis 1999, le laboratoire OEMI poursuit une action de recherche axée sur l'amélioration de la détermination des altitudes par GPS, pour des applications de nivellement de précision. Ce travail est mené en collaboration avec le Service d'Aéronomie (SA) du CNRS, dans le cadre du travail de thèse de Jérôme Tarniewicz (direction : Michel Kasser du Service de Géodésie du Nivellement de l'IGN (SGN) et Jacques Pelon du SA, encadrement : Olivier Bock du SA et Christian Thom du laboratoire OEMI, IGN).

Introduction

L'objectif est d'arriver à faire du positionnement géodésique par GPS avec une précision de l'ordre du millimètre sur la composante verticale pour des sessions de moins de trois heures (nivellement par GPS). La précision atteinte actuellement est de 5 à 10 mm, sur des sessions de vingt-quatre heures, avec des stratégies de calcul GPS standard [DAVIS et al 85], [WARE et al 93] et [DOBSON et al 96]. Cette précision est principalement limitée par trois sources d'erreurs systématiques : la mauvaise modélisation des effets troposphériques (fonctions de projection, cf. ci-dessous), les effets de multi-trajets des ondes à proximité des récepteurs GPS (non modélisés) et les effets d'antennes (variations du centre de phase avec la direction du satellite mal modélisées). Le premier effet étant prédominant, c'est celui-ci que cherchons à mieux corriger dans le cadre de cette action de recherche [TARNIEWICZ 00].

Les effets troposphériques se manifestent par un retard des ondes d'environ 2,30 à 2,50 m au zénith (retard appelé « délai troposphérique »). Les variations sont principalement dues à la variation du contenu en vapeur d'eau dans la basse atmosphère (troposphère). Pour une analyse de données GPS à long terme, ces variations peuvent être considérées comme aléatoires. Toutefois, des structures organisées (cellules convectives, rouleaux), avec des dimensions de l'ordre de 1 km, peuvent subsister sur des durées de l'ordre de l'heure et produire des biais importants dans les observations GPS à court terme.

Nous avons montré par simulations numériques qu'elles pouvaient induire des erreurs systématiques de 1-2 cm sur l'altitude d'une station pour des sessions d'une à vingt-quatre heures [BOCK et al 01a]. Ces erreurs systématiques sont principalement dues au fait que la distribution spatiale d'humidité dans la troposphère est mal modélisée dans les logiciels de traitement GPS. Ces modèles reposent sur l'hypothèse d'une homogénéité de l'atmosphère par couches incluant éventuellement des gradients horizontaux [BOCK, DOERFLINGER 01]. Ces hypothèses sont partiellement vérifiées pour l'air sec (90-99% de la masse), mais très fausses pour la vapeur d'eau. Pour une correction précise du délai troposphérique, la contribution due à la vapeur d'eau doit être éliminée par une observation indépendante.

Des radiomètres micro-ondes et spectromètres solaires sont habituellement utilisés, dans ce but (mais pas de manière opérationnelle pour l'instant). Ils fournissent un contenu intégré en vapeur d'eau assez proche de la composante humide du délai troposphérique [WARE et al 93], [SIERK et al 97] et [DOERFLINGER 97]. Toutefois, la conversion de la mesure radiométrique ou spectrométrique en délai troposphérique « humide » comporte une erreur liée à la méconnaissance de la distribution spatiale de la vapeur d'eau et du profil de température. Nous avons évalué cette erreur à 1 cm environ par simulation numérique en se basant sur des profils de radiosondage [BOCK et al 01b]. La mesure d'un profil de vapeur d'eau jusqu'à 5 km d'altitude semble donc nécessaire pour atteindre une précision de l'ordre du millimètre sur le délai troposphérique humide et sur la composante verticale.

En 2001, nous avons commencé à étudier et à développer un lidar Raman en étroite collaboration avec le Service d'Aéronomie du CNRS (SA). Des simulations numériques, réalisées par J. Tarniewicz, ont guidé notre choix vers un laser YAG émettant à 355 nm. Elles ont montré que des observations de nuit étaient nécessaires pour atteindre la précision requise pour la correction GPS pour des temps d'observation courts (une minute par satellite GPS) [TARNIEWICZ et al 02]. Les points délicats dans cette méthode sont la correction de l'effet des aérosols dont la distribution est très variable et l'étalonnage de l'instrument.

La méthodologie que nous avons commencé à tester, combine :

- l'utilisation simultanée de canaux Rayleigh/Mie, Raman azote et vapeur d'eau, pour la détermination de la transmission des aérosols, en plus du signal vapeur d'eau ;

- un canal externe Rayleigh/Mie pour l'optimisation de l'alignement du lidar et pour la correction des aérosols dans les basses couches (< 1 km) ;
- l'utilisation d'un filtre N₂ commun pour tous les canaux (sauf externe), pour l'étalonnage relatif à court terme ;
- le développement d'un protocole de mesure en laboratoire pour l'étalonnage des composants optiques (variations à long terme). De plus, des mesures simultanées avec des radiosondages lors de campagnes de mesures permettent un l'étalonnage absolu à long terme.

Le lidar Raman IGN-SA a été mis en œuvre, une première fois, lors de la campagne ESCOMPTE, dans la région de Marseille, en juin 2001 : Projet GPS/H₂O associé au programme ESCOMPTE [BOCK et al 02]. Ce projet avait pour ambition de constituer une base de données expérimentales à partir de différentes techniques de sondage de la vapeur d'eau troposphérique (GPS, radiométrie micro-ondes, spectrométrie solaire et lidar Raman). Seize récepteurs GPS ont été déployés durant la période du 6 au 27 juin 2001, sur la ville de Marseille et sa banlieue Nord. Un radiomètre micro-ondes et un spectromètre solaire de l'ETHZ ont fonctionné du 12 au 23 juin au Vallon Dol. Le lidar Raman IGN-SA a été mis en œuvre de nuit entre le 16 et le 26 juin 2001 à Aix-les-Milles.

Les données d'autres instruments sont disponibles sur ce site : radiosondages de Météo-France effectués toutes les six heures du 21 au 26 juin (POI 2a et 2b), récepteur GPS de l'ETHZ et lidar Alto du SA. Le travail de modélisation météorologique qui est prévu autour de MésoNH nous permettra d'analyser la situation 3-D de l'atmosphère pendant notre période d'expérimentation et d'avoir un élément de comparaison sur la distribution spatiale de la vapeur d'eau (en plus de radiosondages). Les premiers résultats obtenus avec le lidar lors de cette campagne d'expérimentation étaient assez encourageants [TARNIEWICZ et al 01]. Toutefois, le système a été optimisé depuis et la portée est maintenant d'environ 4-5 km au zénith pour la vapeur d'eau et plus de 10 km pour le signal Rayleigh/Mie. Fin 2002, il a été intégré dans un camion du CNRS afin de pouvoir le déplacer et faire des mesures comparatives avec d'autres instruments. Il a été mis en œuvre sur le site de Météo-France, à Toulouse, du 21 octobre au 1^{er} novembre 2002, pendant la campagne de validation du capteur AIRS à bord du satellite Aqua (Contrat Météo-France - EUMETSAT) [DABAS et al 03].

Dans la suite de ce document, nous présentons (i) le principe de la mesure et de l'algorithme d'estimation du rapport de mélange de vapeur d'eau par lidar Raman, (ii) les résultats obtenus avec le lidar Raman IGN-SA lors de la campagne de validation du capteur AIRS. Les perspectives de correction du délai troposphérique en GPS à l'aide du lidar Raman seront discutées.

Principe de la mesure de vapeur d'eau par lidar Raman

Les lidars Raman opérationnels

Le principe exploité dans la mesure Raman est le décalage en fréquence de l'onde diffusée qui est spécifique à chaque espèce. On peut ainsi distinguer, par simple filtrage spectral, les molécules telles que H₂O et N₂, dont les décalages sont de 3652 cm⁻¹ et 2331 cm⁻¹, respectivement. Ce décalage est indépendant de la longueur d'onde émise, ce qui permet d'utiliser des lasers commerciaux courants, tels que les lasers Nd:YAG, sans contrainte particulière quant à la longueur d'onde (pas d'asservissement). Le processus de diffusion Raman est toutefois très faible (sa section efficace est de l'ordre de 10⁻²⁹ cm²sr⁻¹ comparée à celle de la diffusion Rayleigh qui est de 10⁻²⁶ cm²sr⁻¹). La mesure de signaux Raman nécessite donc un laser puissant et/ou un télescope de grand diamètre et des détecteurs très sensibles.

La transmission atmosphérique peut être un effet limitant à prendre en compte pour le choix de la longueur d'onde du laser. Par ciel clair, la diffusion Rayleigh est le principal effet limitant et l'utilisation de grandes longueurs d'ondes est préférable si l'on souhaite faire des mesures à grande distance (cas du lidar Raman de l'OHP pour le sondage de la haute troposphère qui fonctionne à 532 nm [SHERLOCK et al 99]. Pour des systèmes étudiant plutôt la couche limite, des longueurs d'ondes plus courtes sont parfois utilisées (cas du lidar de Renaut et Capitini, 1988, à 266 nm). Ce dernier a l'avantage de fonctionner de nuit comme de jour, car le rayonnement de fond de ciel est négligeable pour $\lambda < 290$ nm. Pour le sondage dans la troposphère (0-10 km), également de nuit et de jour, des longueurs d'ondes intermédiaires sont couramment utilisées (355 nm pour le lidar CART de l'ARM [GOLDSMITH et al 98], et 355 nm de nuit/351 nm de jour, pour le SRL de la NASA [WHITEMAN et al 92].

Pour permettre une mesure de jour, ces systèmes utilisent des filtres interférentiels étroits (0,3 nm) afin de réduire le flux du fond de ciel. Ces systèmes sont très puissants (lasers de 300 à 400 mJ à 30 Hz et télescopes de 61 et 76 cm respectivement pour le lidar du CART et le SRL). Par conséquent, la dynamique du signal reçu est très grande pour un sondage de 0 à 10 km d'altitude. Ces systèmes ont ainsi des voies optiques dédoublées, avec deux champs différents : champ large (~2 mrad) pour les basses couches et champ étroit (~0,3 mrad) pour les hautes couches (ce qui réduit également le flux du fond de ciel).

Les signaux issus des basses couches sont généralement assez forts et leur détection est possible en mode analogique. À l'inverse, les signaux issus des couches plus élevées sont faibles et doivent être mesurés en mode « comptage de photons » (pour le lidar du CART, les signaux basses-couches sont atténués et détectés en comptage de photons). Les canaux de détection sont donc, en général, également dédoublés pour une acquisition des basses couches et des hautes couches. Les systèmes CART et SRL sont assez volumineux et installés dans des containers transportables. Le SRL est équipé d'un dispositif de balayage dans un plan (Scanning Raman Lidar), tandis que le lidar CART est à visée fixe au zénith.

Ce dernier est toutefois un système autonome pouvant fonctionner de manière continue pendant plusieurs jours. Il a accumulé plus de 9 000 heures de mesures *quasi* continues de rapport de mélange de vapeur d'eau depuis 1998. L'étalonnage de ces systèmes est une étape critique pour laquelle des efforts de recherche sont toujours en cours (cf. ci-dessous).

Le lidar Raman IGN-SA

Par rapport aux systèmes CART et SRL, le lidar Raman IGN-SA est un système beaucoup plus modeste (cf. description ci-dessous). Il est installé à bord d'un camion (type Master) et, est par conséquent, facilement transportable. Dans sa version actuelle, il permet de faire des mesures de nuit, au zénith, mais il est prévu de le doter d'une capacité de mesure directionnelle (sur l'hémisphère) de jour.

Les essais récents ont montré que par temps clair, il permettait de restituer des profils de rapport de mélange jusqu'à 6-8 km d'altitude. Sa distance de sécurité oculaire est de 200 m pour dix secondes d'exposition. Le lidar Raman IGN-SA est composé d'un laser Nd:YAG triplé (355 nm) en émission coaxiale avec le télescope de réception (figure B.5.1, ci-dessous), d'un couplage par fibre optique, d'un boîtier de filtrage spectral et de détection par photomultiplicateurs (PM) à trois longueurs d'onde (355 nm-Rayleigh/Mie, 387 nm-Azote, 408 nm-Vapeur d'eau) et d'un canal « externe » en détection directe (à 355 nm) sur le côté du télescope.

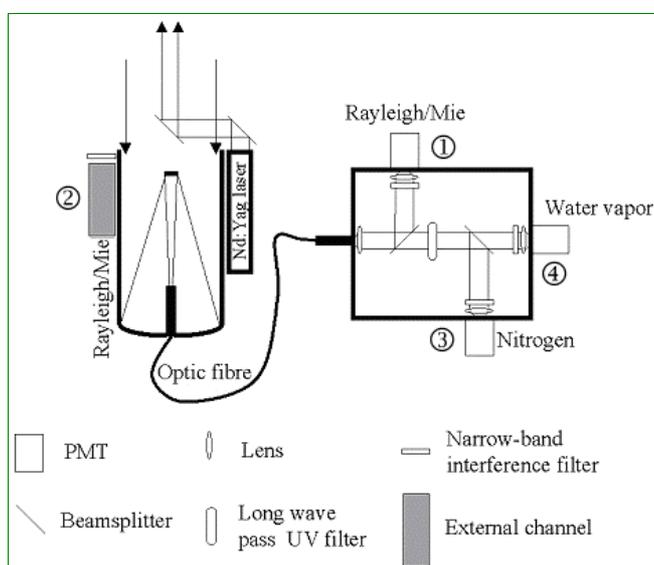


figure B.5.1

*Vue schématique du lidar Raman IGN-SA (cf. description dans le texte).
Les voies d'acquisition sont numérotées de 1 à 4.*

L'acquisition des données est faite par un rack Licel disposant de deux canaux AD (analogique/digital) et deux canaux PC (comptage de photons), piloté par Labview sous PC/Windows. Notre système dispose de deux mesures de signaux Rayleigh/Mie : par une voie optique au niveau du boîtier de filtrage/détection, appelée « interne » et une voie appelée « externe » qui ne passe pas par le télescope. Cette voie externe sert de référence pour l'étalonnage optique du système : le rapport des signaux interne/externe permet d'optimiser le réglage de la position de la fibre au foyer du télescope et l'alignement des éléments optiques dans le boîtier de filtrage/détection.

Par ailleurs, les signaux Rayleigh/Mie permettent de suivre l'évolution du contenu en aérosols et de la couverture nuageuse tout au long des mesures. Ces informations sont utiles d'un point de vue qualitatif pour détecter des périodes temporelles et les portions d'atmosphère où l'extinction est trop forte pour permettre une mesure précise du rapport de mélange.

L'inversion du signal Rayleigh/Mie permet également d'estimer la transmission des aérosols pour une correction précise des signaux azote et vapeur d'eau (ceci n'est utile que pour la détermination de concentrations absolues). Pour la détermination du rapport de mélange, une correction de transmission différentielle par un modèle standard (par exemple : Modtran) est généralement suffisante (précise à 3-4%).

Dans notre système, les voies optiques et les canaux d'acquisition ne sont pas dédoublées. Par conséquent, les signaux issus des basses couches peuvent être saturés. Cette saturation est toutefois limitée car le dimensionnement du système est bien optimisé (puissance laser, diamètre du télescope et rapport signal/bruit des mesures). Une modélisation de la saturation est possible et permet ainsi de restituer des signaux non biaisés dans les basses couches.

Parmi les évolutions prévues à court terme, nous envisageons d'utiliser des filtres interférentiels étroits afin de pouvoir réaliser des mesures Raman de jour. Nous prévoyons également de mettre au point un dispositif de balayage mécanique (motorisation de l'ensemble télescope et laser) pour pouvoir effectuer des mesures directionnelles sur tout l'hémisphère. Cette dernière fonction est particulièrement utile pour les applications de couplage avec des mesures GPS [TARNIEWICZ et al 01].

table B.5.1 : caractéristiques des éléments du lidar Raman IGN-SA

Emission Laser Quantel Brillant (Nd:YAG triplé)	Fréquence de répétition Energie par pulse Divergence (après afocal) Diamètre faisceau (après afocal)	10 Hz 30 mJ @ 355 nm ≈ 0,1 mrad 27 mm
Réception Télescope type Cassegrain Fibre optique quartz	Diamètre/focale Diamètre/champ en réception	30 cm / 1 m 0,8 mm / 0,8 mrad
Filtrage Rayleigh/Mie Azote Vapeur d'eau	λ / FWHM / transmission	Filtres interférentiels 355 nm / 4,7 nm / 35% 387 nm / 7 nm / 40% 408 nm / 6 nm / 40%
Détection Hamamatsu Série 7400	RQ @ 355 / 387 / 408 nm	Photo-multiplieurs ~ 20%
Acquisition Rack Licel mode AD/PC $\Delta t = 50$ ns ($\Delta z = 7,5$ m) Fichiers de 200 tirs (20 s)	Signal / mode	355 nm / AD (analogique/digital) 387 nm / PC (comptage de photons) 408 nm / PC

Détermination du rapport de mélange

Le rapport de mélange est défini comme le rapport des densités de vapeur d'eau et d'air sec : $q = \rho_{H_2O} / \rho_{sec}$. La densité d'air sec est accessible *via* la densité d'azote, car ce gaz est bien mélangé dans la basse atmosphère ($z < 100$ km) : $q = (\rho_{H_2O} / \rho_{N_2}) \times r_{N_2}$, avec r_{N_2} le rapport de mélange en masse d'azote dans l'air sec.

En introduisant les masses molaires de vapeur d'eau et d'azote notées respectivement M_{H_2O} et M_{N_2} et leurs concentrations N_{N_2} , $N_{H_2O}(z)$ et $N_{N_2}(z)$, accessibles par la mesure lidar, on obtient pour le rapport de mélange :

$$q(z) = \frac{N_{H_2O}(z)}{N_{N_2}(z)} \times \left(\frac{M_{H_2O}}{M_{N_2}} \times r_{N_2} \right) \quad (1)$$

Les mesures à 387 et 408 nm donnent accès à la concentration d'azote et de vapeur d'eau après correction de différents effets. Les signaux mesurés sur les canaux vapeur d'eau et azote sont reliés aux concentrations par les équations suivantes [GOLDSMITH et al 98] :

$$S_{H_2O}(z) = \frac{E_o c A}{h \nu_0 2 z^2} \Delta t T(0, z; \lambda_{355}) T(z, 0; \lambda_{408}) O(z) T_4 \eta_4 \sigma_{H_2O} N_{H_2O}(z) \quad (2)$$

$$S_{N_2}(z) = \frac{E_o c A}{h \nu_0 2 z^2} \Delta t T(0, z; \lambda_{355}) T(z, 0; \lambda_{387}) O(z) T_3 \eta_3 \sigma_{N_2} N_{N_2}(z) \quad (3)$$

avec $\frac{E_o}{h \nu_0}$ le nombre de photons émis, c la célérité de la lumière, Δt la durée d'intégration (50 ns), A la surface

de réception du télescope, z la distance lidar - couche sondée, $T(0, z, \lambda_x)$ la transmission atmosphérique du sol à la distance z à la longueur d'onde λ_x , $O(z)$, la fonction de recouvrement en réception ou « overlap » (principalement due à la défocalisation au niveau de la fibre optique dans le télescope), T_y la transmission optique sur la voie y ($y = 3$ pour N_2 et 4 pour H_2O pour notre système), η_y le rendement quantique du PM sur la voie y , σ_{N_2} et σ_{H_2O} les sections efficaces de rétrodiffusion [INABA 76].

Notons que, dans notre cas, l'utilisation de filtres interférentiels larges (5-6 nm) permet de s'affranchir de la dépendance en température des sections efficaces [INABA 76], [WHITEMAN et al 92] et [SHERLOCK et al 99]. Du fait de l'acquisition des signaux en mode comptage de photons, une saturation a lieu dans les basses couches où le niveau du signal est le plus élevé (diminution en $1/z^2$ avec la distance). Avec notre système, cette saturation devient importante lorsque le nombre de photons/porte de 50 ns devient supérieur à 1 (typiquement de 0 à 1 000 m). La première étape du traitement des données consiste donc à « désaturer » les signaux à l'aide d'une fonction ajustée sur des mesures spécifiques faites au préalable. Ces mesures sont réalisées avec un filtre commun à 387 nm sur les voies 3 et 4 (correspondant en mode normal aux signaux N_2 et H_2O). La seule différence sur les deux voies provient ainsi des termes de transmission optique (T_y) et des rendements quantiques (η_y).

Dans ces conditions, le signal mesuré sur la voie 3 est exempt de saturation (le signal est faible car on mesure la réflexion sur la dernière lame) alors que le signal sur la voie 4 (en transmission) est, lui, saturé. Ces deux signaux permettent ainsi de modéliser les effets de saturation (une fraction rationnelle est ajustée par moindres carrés).

Afin d'arriver aux signaux modélisés par les équations (2) et (3), il faut aussi éliminer la contribution du fond de ciel (signal additif constant). Celui-ci est estimé sur une portion du signal où il n'y a plus d'information utile ($z > 20$ km, l'acquisition se faisant jusqu'à 40 km). Afin de prendre également en compte des effets de génération d'électrons secondaires dans les PM, une fonction d'ordre supérieur ou égal à 1 est ajustée.

Lorsqu'on forme le rapport de signaux désaturés, corrigés du fond de ciel, un grand nombre de termes présents dans les équations (2) et (3) disparaissent. Il reste ensuite à corriger uniquement des effets différentiels : transmissions atmosphériques, transmissions optiques, rendements quantiques des PMs, sections efficaces et les termes reliant les concentrations aux masses. Le rapport de mélange s'écrit finalement :

$$q(z) = \frac{S_{H_2O}(z) T(z,0;\lambda_{387}) T_3 \eta_3 \sigma_{N_2} M_{H_2O}}{S_{N_2}(z) T(z,0;\lambda_{408}) T_4 \eta_4 \sigma_{H_2O} M_{N_2}} r_{N_2} \quad (4)$$

Pour les sections efficaces, des modèles d'origine empirique sont utilisés [INABA 76] [PENNEY, LAPP 76].

Pour la transmission différentielle d'origine atmosphérique, des modèles standards pour la diffusion de Rayleigh [USSA 66] et la diffusion de Mie, par exemple : MODTRAN, [SHETTLE, FENN 79], sont suffisants. Les effets de transmission à corriger, pour une altitude de 10 km, sont de 0,94 pour la diffusion de Rayleigh et 0,95-0,99 pour la diffusion de Mie avec une visibilité variant entre 10 et 50 km. Ce sont donc des effets relativement faibles et l'incertitude due au contenu en aérosols, inconnu au moment des mesures, est sûrement inférieur à 3-4%.

La correction des transmissions optiques et des rendements quantiques est plus délicate. Ces termes sont très difficiles à déterminer avec précision car ils interviennent à deux longueurs d'ondes (387 et 408 nm). Un étalonnage radiométrique absolu serait ainsi nécessaire. En pratique nous déterminons ces facteurs pour une longueur d'onde commune (par exemple : 387 nm), ce qui permet de faire une correction approximative (étalonnage relatif).

Les effets différentiels sont finalement compensés en recalant un rapport de mélange lidar sur un rapport de mélange issu d'un radiosondage (ou d'un ensemble de radiosondages). Cet étalonnage a été réalisé lors de la campagne de validation AIRS présentée ci-dessous. Nous avons constaté qu'il restait tout à fait valable pour des mesures effectuées depuis, en région parisienne, en comparaison avec des profils issus des sondages de Trappes.

Avant de former le rapport des signaux lidars, $S_{H_2O}(z) / S_{N_2}(z)$, il faut procéder à une étape de filtrage et d'intégration des signaux. Vu le rapport signal/bruit (RSB) de nos signaux, nous effectuons une moyenne temporelle sur au moins cinq minutes et verticale variable en altitude. Le pas de cette dernière est déterminé de manière automatique en analysant la variabilité des deux signaux. L'épaisseur est ajustée de manière à avoir un $RSB \geq 5$, avec une limite inférieure de 50 m et supérieure de 500 m. Une moyenne glissante est appliquée avec la largeur ainsi déterminée. Les données finales sont conservées avec une résolution verticale de 50 mètres.

Résultats de la campagne de validation AIRS 2002

Nous avons participé à la campagne de validation du capteur AIRS organisée par le CNRM sur le site de Météo-France à Toulouse [DABAS et al 03]. Durant toute la campagne AIRS (15 août-15 novembre 2002), deux radiosondes ont été lancées chaque nuit (une heure avant et cinq minutes avant le passage nocturne du satellite) par l'équipe GMEI du CNRM. Le lidar Raman a été déployé entre le 21 novembre et le 1^{er} octobre 2002 sur le site de Météo-France à Toulouse. L'objectif de cette participation était de fournir deux heures de mesures continues autour du passage nocturne du satellite Aqua (ce dernier variant entre 01:30 et 02:30 TU).

Plus de cinquante heures de mesure de vapeur d'eau ont été réalisées pendant les onze nuits. Certaines nuits, le lidar a fonctionné de manière continue pendant plus de dix heures. La figure B.5.2, page suivante, montre une série temporelle longue qui met en évidence une variabilité nocturne importante de la distribution verticale d'humidité dans la basse troposphère. Une telle variabilité n'est pas mesurable par radiosondage. De plus, le sondage ne va fournir qu'un profil à un moment bien particulier, qui peut être assez éloigné de la distribution verticale moyenne.

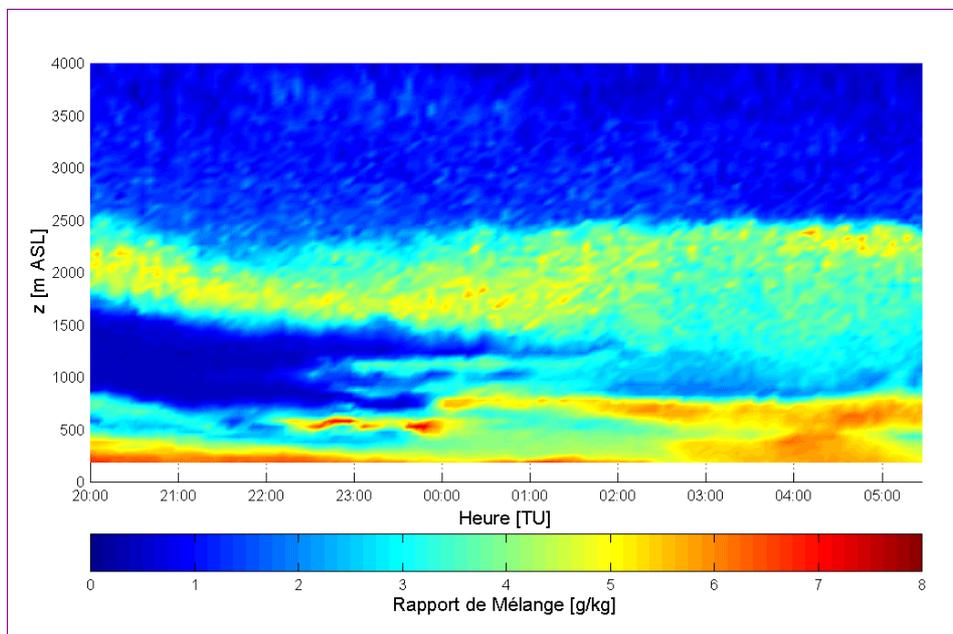


figure B.5.2

*Rapport de mélange mesuré avec le lidar IGN/SA (nuit du 28 au 29 octobre 2002).
Résolution temporelle de cinq minutes et verticale de 50 à 500 mètres.*

Les profils lidar ont été comparés aux profils mesurés par radiosondage. Les figures B.5.3 et B.5.4, ci-dessous et page suivante, montrent les résultats pour les 27, 28, 29 et 30 octobre 2002 (un seul radio-sondage est utilisé). Les données du lidar Raman sont dans ce cas intégrées sur vingt minutes à partir du lancer de la radiosonde, ce qui correspond au temps que met celle-ci à atteindre environ six kilomètres d'altitude.

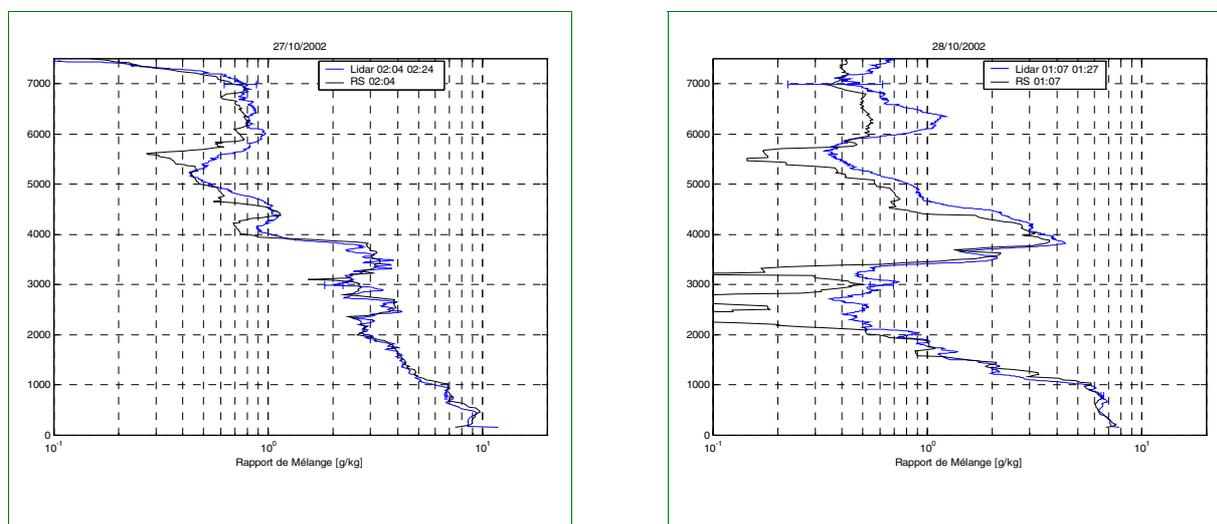


figure B.5.3 : comparaison lidar Raman/radiosondage, 27 et 28 octobre 2002

Les profils lidar et radiosonde sont en très bon accord jusqu'à 4 000 m, sauf pour le 28 octobre 2002 où les données de la radio-sonde semblent aberrantes entre 2 000 et 2 500 m. En altitude, des différences sont notables et il semblerait que le lidar a tendance à sur-estimer le contenu en vapeur d'eau. Les structures dans les profils coïncident en général assez bien, sachant que les deux instruments ne mesurent pas exactement la même région de l'atmosphère au même moment. Par conséquent, une comparaison quantitative doit être interprétée avec précaution.

La figure B.5.5 représente l'écart relatif calculé par couche de 500 m d'épaisseur (écart-type sur valeur moyenne : $\sigma(q_{RS} - q_{Lidar}) / q_{RS}$). À la vue des profils des figures B.5.3 et B.5.4 (page suivante), on peut considérer que les maxima de la différence entre lidar et radio-sondage sont liés à (i) la variabilité atmosphérique, (ii) des problèmes de la radiosonde, et (iii) des pics de bruit dans le signal lidar. La précision relative des profils lidar est donc sans doute de l'ordre de 10% jusqu'à 6 000 m.

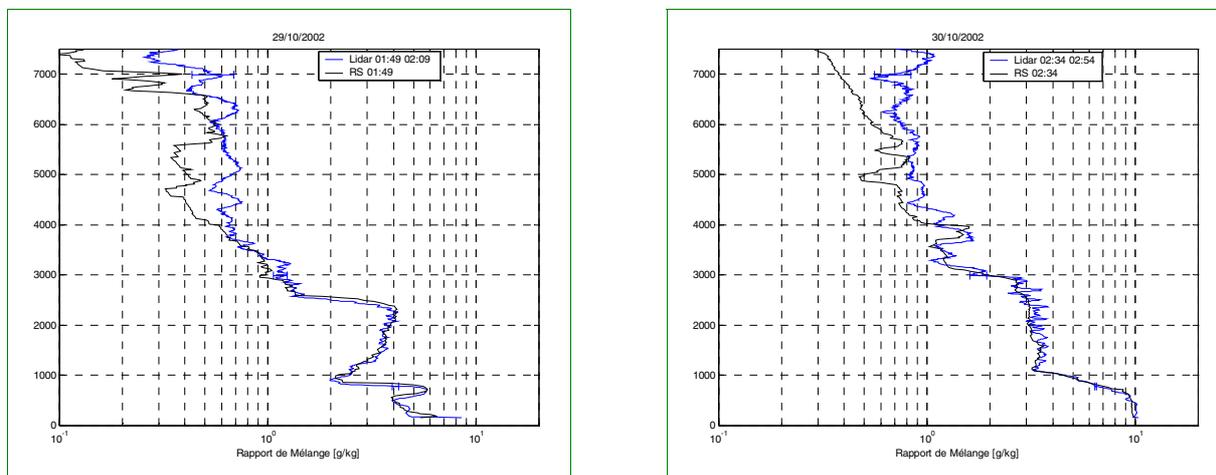


figure B.5.4 : comparaison lidar Raman/radiosondage, 29 et 30 octobre 2002

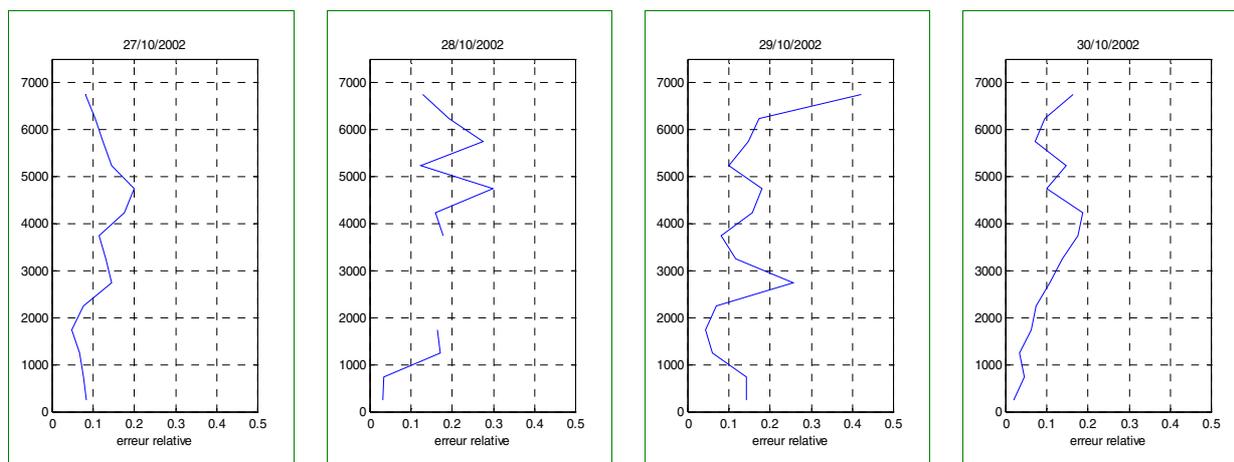


figure B.5.5

Écart relatif lidar Raman - radio-sondage, pour les 27, 28, 29 et 30 octobre 2002.
Les points aberrants du radio-sondage du 28 octobre 2002 ne sont pas pris en compte.

Conclusions et perspectives

Le lidar Raman développé en collaboration entre IGN et la SA permet à l'heure actuelle de restituer des profils de vapeur d'eau (rapport de mélange) en très bon accord avec les radiosondages jusqu'à 4 000 m (soit 80-90% du délai troposphérique humide) et avec un léger biais (qui devrait pouvoir être corrigé en améliorant les algorithmes de traitement) jusqu'à environ 7 000 m (soit 95-99% du délai troposphérique humide). Pour atteindre une telle portée, les données sont actuellement intégrées sur vingt minutes, pour une résolution verticale de 50 m dans les basses couches. Ce temps d'intégration est toutefois trop long pour l'application à la correction des délais dans la direction des satellites GPS, tel que prévu à terme.

Il est possible de réduire par un facteur deux ce temps d'intégration en passant le laser à une cadence de tir de 20 Hz. Le temps d'intégration devrait pouvoir être limité à cinq minutes, si une restitution des profils d'humidité jusqu'à 5 km d'altitude est suffisante et si les profils intégrés peuvent sur des couches plus épaisses (100 à 200 m). Ces hypothèses sont encore à vérifier. Pour arriver à un fonctionnement de jour, nous envisageons également de doter notre système d'un jeu de filtres interférentiels étroits.

La prochaine étape dans le développement du système pour la correction du délai troposphérique humide comporte l'asservissement de la plate-forme pour le pointage dans la direction des satellites GPS. Un stage de fin d'études d'ingénieur est prévu pour cela au printemps 2003. Des tests seront ensuite réalisés avec le système lidar et une station GPS. Ces données GPS seront alors traitées après avoir réalisé la correction du délai troposphérique humide restitué par le lidar.

Références

[DAVIS et al 85] J. Davis, T. Herring, I. Shapiro, A. Rogers and G. Elgered : *Geodesy by radio-interferometry : effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline lengths*, Radio Sci. 20, 1593-1607, 1985.

- [DODSON et al 96] A.H. Dodson et al : *Wet tropospheric effects on precise relative GPS height determination*, in J. Geod., 70, 188-202, 1996.
- [DOERFLINGER 97] E. Doerflinger : *Utilisation de la méthode de positionnement satellitaire GPS pour la détermination précise des altitudes relatives et absolues*, thèse de l'Université de Montpellier-2, soutenue le 13 Juin 1997.
- [GOLDSMITH et al 98] J.E.M. Goldsmith, F. Blair, E. Bisson, and D.D. Turner : *Turn-key Raman lidar for profiling atmospheric water vapor, clouds, and aerosols*, in Appl. Opt., 37, 4979-4990, 1998.
- [INABA 76] H. Inaba : *Detection of atoms and molecules by Raman scattering and resonance fluorescence in Laser monitoring of the atmosphere*, chap. 5, E.D. Hinkley (ed), Springer, Berlin-Heidelberg-New York, 1976.
- [MACMILLAN, MA 98] D.S. MacMillan and C. Ma : *Using meteorological data assimilation models in computing tropospheric delays at microwave frequencies*, in Phys. Chem. Earth, 23, 97-102, 1998.
- [NIELL 01] A.E. Niell : *Preliminary evaluation of atmospheric mapping functions based on numerical weather models*, in Phys. Chem. Earth, 26, 475-480, 2001.
- [PENNEY, LAPP 76] C. M. Penney and M. Lapp : *Raman-scattering cross sections for water vapor*, in J. Opt. Soc. Am. 66, 422-425, 1976.
- [RENAUT 88] D. Renaut and R. Capitini : *Boundary-layer water vapor probing with a solar-blind Raman lidar : validations, meteorological observations and prospects*, in J. Atmos. Ocean Tech., Vol. 5, p. 585-601, October 1988.
- [SHERLOCK 99] V. Sherlock, A. Hauchecorne and J. Lenoble : *Methodology for the independant calibration of Raman backscatter water-vapor lidar system*, in Appl. Opt., Vol. 38, N°27, 20 Sept. 1999.
- [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.
- [SIERK 97] B. Sierk, B. Bürki, H. Becker, S. Florek, R. Neubert, L. Kruse and H. Kahle : *Tropospheric water vapor derived from solr spectrometer, radiometer and GPS measurements*, in J. Geophys. Res., 102, B10, 22,411-22,424, 10 October, 1997.
- [USSA 66] *U.S. Standard Atmosphere*, Washington, DC : U.S. Government Printing Office, 1966.
- [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 positioning 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 01a] O. Bock, J. Tarniewicz, C. Thom and J. Pelon : *Effect of Small-Scale Atmospheric Inhomogeneity on Positioning Accuracy with GPS*, in Geophys. Res. Lett., 28 , N°11, p. 2289, laboratoire OEMI, IGN-SR-01-002-L-ART-OB, 2001.
- [BOCK et al 01b] 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*, in Phys. Chem. Earth, 26, 165-171, laboratoire OEMI, IGN-SR-01-001-L-ART-OB, 2001.
- [BOCK et al 02] O. Bock, E. Doerflinger, F. Masson, A. Walpersdorf, J. Van-Baelen, J. Tarniewicz, M. Troller, A. Somieski, A. Geiger and B. Bürki : *GPS Water Vapor Dynamics and Tomography Studies with a Dense Network of GPS Receivers during the ESCOMPTE Campaign : Preliminary Results*, COST-716 Workshop, Potsdam (D), 28-29 January 2002, laboratoire OEMI, IGN-SR-02-002-L-COM-OB, 2002.
- [BOCK, DOERFLINGER 01] O. Bock and E. Doerflinger : *Atmospheric modeling in GPS data for high accuracy positioning*, in Physics and Chemistry of the Earth, MS No.: C01, laboratoire OEMI, IGN-SR-01-005-L-ART-OB, 2001.
- [DABAS et al 03] A. Dabas, J. Van-Baelen, J.-P. Aubagnac, O. Bock, Y. Morille, J. Tarniewicz, E. Gimonet, B. Garayt & T. Duquesnoy : *Télémesure du contenu atmosphérique en vapeur d'eau depuis le sol : comparaison RS/GPS/Radiomètre/lidar*, in Actes des Ateliers d'Expérimentation et d'Instrumentation, Brest (F), 28-29 janvier 2003, laboratoire OEMI, IGN-SR-03-002-L-COM-OB, 2003.
- [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, Activité recherche 2000 , n°72, pp 59-68, laboratoire OEMI, IGN-SR-00-011-L-ART-JT, 2000.
- [TARNIEWICZ 02] J. Tarniewicz, O. Bock, J. Pelon and C. Thom : *Raman Lidar for External GPS Path Delay Calibration Devoted to High Accuracy Height Determination*, in Phys. Chem. Earth, 27, 329-333, laboratoire OEMI, IGN/SR-02-001-L-ART-JT, 2002.

B.6 Unification des bases de données géographiques

Sébastien Mustière, Nils Gesbert & David Sheeren

Introduction

De nombreuses bases de données géographiques coexistent pour représenter un même espace du monde réel. Ces bases ont été réalisées pour répondre à différents besoins (topographie, navigation, urbanisme...) à différents niveaux d'analyse (échelle du pays, de la ville...).

Une gestion relativement indépendante de ces bases pose de nombreux problèmes :

- incohérences entre bases amenant des réponses contradictoires selon les bases utilisées ;
- multiplication des efforts de saisie, de maintenance et de mise à jour ;
- difficulté de réaliser des analyses combinant différents niveaux d'analyse.

Une solution possible à ces problèmes passe par l'unification des bases de données, qui vise à rendre explicites les relations entre les divers éléments des bases de données. Celle-ci peut prendre la forme d'une fusion, où différentes bases sont compilées pour créer une nouvelle base mono-représentation plus riche. Elle peut également prendre la forme d'une représentation multiple où différentes représentations d'un même phénomène coexistent dans une base et sont reliées entre elles.

Au sein d'une base de données, on distingue le schéma de données elles-mêmes. Lors de l'unification, ces deux aspects sont aussi importants l'un que l'autre. Tout d'abord, l'unification doit se faire au niveau des schémas : quels éléments du schéma d'une base de donnée (classe/relation/attribut) correspondent à quels éléments du schéma d'une autre Base de Données (BD) ? L'unification concerne aussi les données géographiques : quelles instances de la base de données correspondent à quelles instances d'une autre BD ?

De plus, ces deux aspects sont intimement liés. L'unification des données doit s'appuyer sur l'unification des schémas, car celle-ci permet de préciser quelles instances peuvent être mises en relation (des *Routes* d'une BD avec des *Voies de communication* de l'autre BD, par exemple). Mais inversement, l'étude des instances permet de guider l'unification des schémas. Par exemple, si tous les objets ayant pour attribut *Classement* = « *Nationale* » dans une BD sont reliés à des objets ayant pour attribut *Importance* = « *Principal* », on peut supposer une relation au niveau des schémas entre les attributs *Classement* et *Importance* et entre leurs valeurs « *Nationale* » et « *Principal* ».

Un autre élément des bases de données est extrêmement important pour guider leur unification : les spécifications de contenu qui décrivent les éléments du schéma et les règles d'instanciation de celui-ci (qu'est-ce que l'on appelle *Rivière* dans la BD considérée ?).

Au laboratoire COGIT, l'action de recherche « *Unification des bases de données géographiques* » a pour but de traiter des problèmes relatifs à la création, la gestion et l'utilisation de telles bases unifiées. Elle aborde les problèmes liés aux schémas de données, comme aux données elles-mêmes, et s'appuie sur l'étude des spécifications des bases de données.

L'équipe de l'action de recherche est actuellement constituée de trois personnes : Sébastien Mustière, responsable de l'action depuis mai 2002, David Sheeren, en thèse avec le laboratoire d'informatique de Paris-6 depuis novembre 2001 et Nils Gesbert, en thèse avec les Universités de Marne-la-Vallée et Montpellier depuis novembre 2001.

Travaux antérieurs

Les travaux de l'action de recherche « *Unification des bases de données géographiques* » sont dans la continuité de travaux engagés, depuis environ dix ans, au laboratoire COGIT sur l'analyse des différences entre BD géographiques, autant au point de vue des schémas de données (modélisations du monde réel) que des données (instanciations de ces schémas).

En particulier, divers travaux ont été effectués sur l'appariement de données (mise en correspondance de données de différentes bases), l'intégration de différentes BD en une BD unique, la propagation des mises à jour d'une BD à une autre, la modélisation des BD à représentation multiple et la généralisation qui a pour nature même de manipuler plusieurs BD à différents niveaux de détails. Ces travaux ont pris la forme de thèses et de stages (cf. liste des publications en fin d'article) et, plus récemment, d'une participation au projet européen *MurMur* que nous décrivons brièvement, plus loin.

Le Projet européen de recherche *MurMur* (Multiple Representation and Multiple Resolution in geographic databases) a réuni six partenaires européens (Université libre de Bruxelles, École polytechnique fédérale de Lausanne, CEMAGREF, STAR Informatique, Université de Lausanne, IGN), de janvier 2000 à décembre 2002.

Son objectif était de développer une plate-forme logicielle (un AGL, « atelier de génie logiciel », cf. figure B.6.1, cette plate-forme est consultable au laboratoire COGIT). Cette plate-forme, associée au système de gestion de bases de données Oracle, permet de modéliser (manipulation graphique de schémas de données à représentation multiple), créer (création automatique de tables relationnelles à partir des schémas), puis interroger (création de requêtes SQL en manipulant une représentation graphique des schémas) une base de données à représentation multiple. Ces outils se sont appuyés sur le langage de modélisation MADS dédié à la représentation de bases de données géographiques.

Le laboratoire COGIT a participé au projet *MurMur* en tant que producteur et utilisateur de données : son rôle a consisté à définir les spécifications du logiciel, qui devait permettre d'unifier plusieurs bases de données en une base à représentations multiples, puis à le tester tout au long du développement. Durant le projet, notre laboratoire a imaginé des cas d'utilisation du prototype *MurMur*, qui ont menés à des spécifications détaillées. Le processus d'unification par *MurMur* a été entièrement réalisé sur des données test (le thème routier de BD Topo, BD Carto et Géoroute sur une petite surface) : un schéma de BD unifiée a été conçu puis édité sur l'éditeur de schéma conceptuel développé par *MurMur*.

Le schéma logique sous forme de tables Oracle de cette base a été automatiquement créé à partir du schéma conceptuel MADS. Les données ont ensuite été appariées puis importées dans une base de données à représentation multiple sous Oracle. Enfin, l'éditeur graphique de requêtes *MurMur* permet de consulter cette base en utilisant les concepts de la représentation multiple : par exemple, on peut demander dans l'interface graphique de sélectionner les objets de la classe C1 pour lesquels l'attribut A1 a pour valeur x1 dans une représentation et qui correspondent à un objet de la classe C2 dont l'attribut A2 a pour valeur x2 dans une autre représentation.

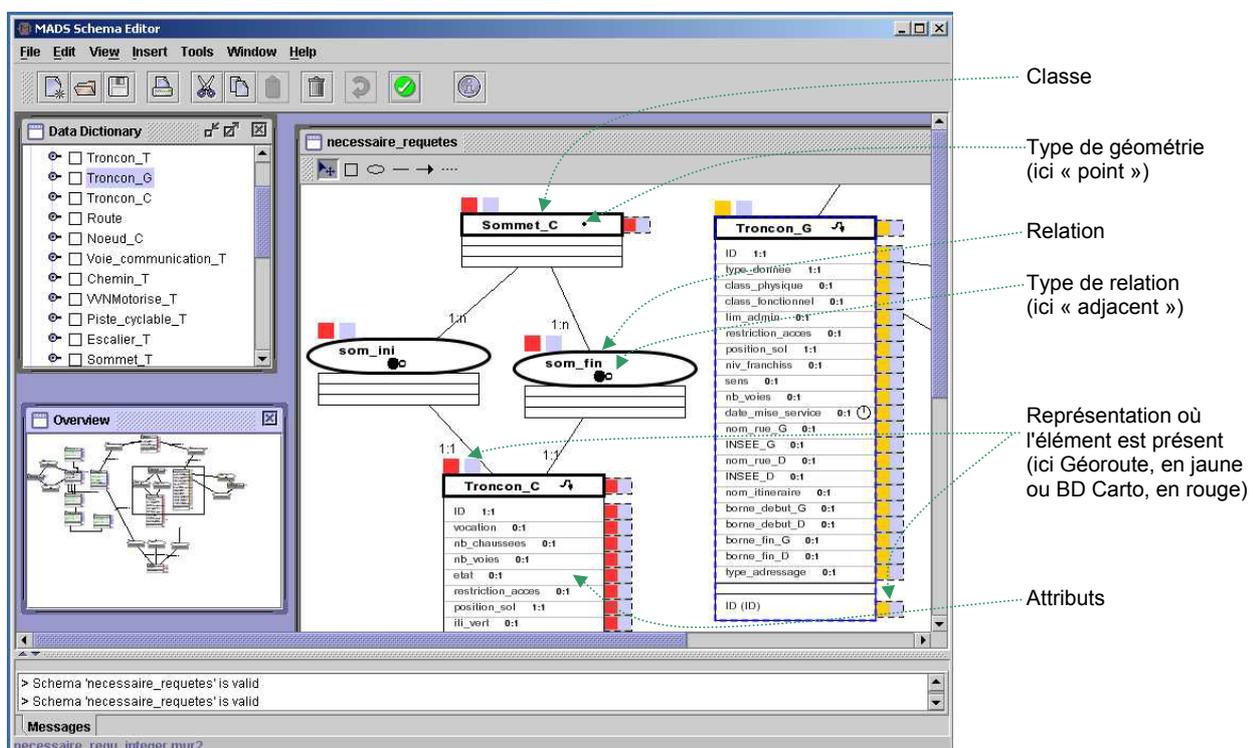


figure B.6.1 : éditeur de schéma à représentation multiple de *MurMur*

Travaux en cours : constitution d'une Base de Données à représentation multiple

Les recherches sur les BD à représentation multiple concernent leur constitution, leur gestion et leur utilisation. La constitution étant un préalable pour pouvoir tester la gestion et l'utilisation, les objectifs de l'action de recherche « Unification des bases de données géographiques » pour les années 2002-2004 se concentrent en premier lieu sur le processus de constitution d'une BD à représentation multiple.

La constitution d'une telle BD nécessite deux grandes étapes : l'établissement de règles de correspondance entre les BD (analyse puis unification des schémas), puis la réalisation effective de la BD à représentation multiple (mise en correspondance puis unification des données). Ceci est illustré par la figure B.6.2, page suivante, expliquée plus loin.

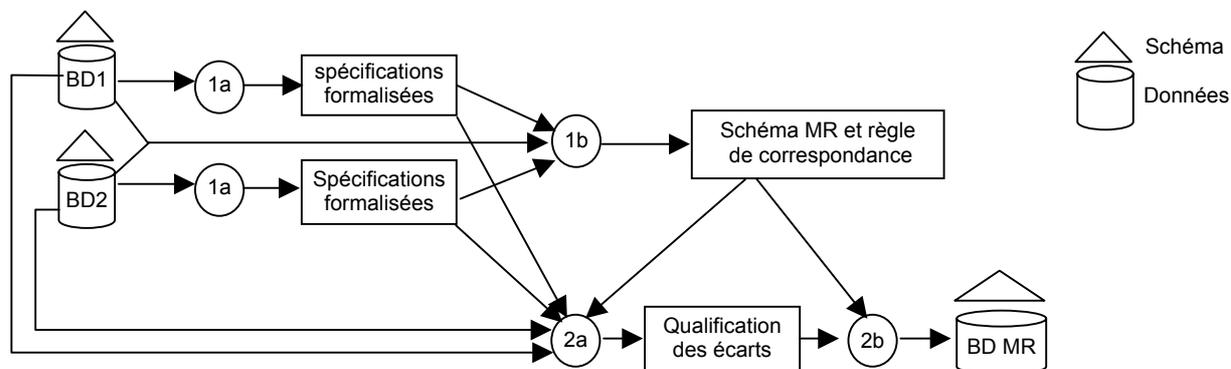


figure B.6.2 : processus de constitution d'une BD à représentation multiple

Formaliser les spécifications des bases de données (1a)

Pour relier des bases de données, il faut tout d'abord comprendre ce que chacune d'elles contient individuellement. En pratique, une grande part de l'information décrivant une BD est contenue dans ses spécifications. Par exemple, seules les spécifications permettent de décrire quelles entités du monde réel sont supposées être représentées dans la classe *Rivière* d'une première BD (les cours d'eau temporaires et les canaux en font-ils partie ?), et si cela correspond aux *Cours d'eau* d'une autre BD.

Or, si les schémas de données sont représentés de manière formelle sous la forme de schémas (par exemple dans le langage UML), les spécifications restent encore généralement sous forme de description papier en langage naturel. Un premier objectif de l'action de recherche « *Unification des bases de données géographiques* » est donc de fournir un modèle pour formaliser les spécifications des BD, pour pouvoir les analyser et les manipuler plus efficacement. Un premier modèle formel de ces spécifications a été défini et en partie instancié dans le cadre des thèses de Nils Gesbert et David Sheeren. La figure B.6.3, page suivante, décrit ce modèle dans le langage UML.

Ce modèle permet de décrire quelles contraintes doit respecter un objet du monde réel pour être représenté dans la BD. Une telle contrainte peut être par exemple que seules les rivières permanentes et de longueur supérieure à 100 mètres sont représentées dans la BD. En ce cas, la classe « *Rivière* » sera associée à une *contrainte complexe* reliant, d'une part, une *contrainte de nature* avec pour *critère* « permanent » et, d'autre part, une *contrainte géométrique* avec pour *critère* « longueur », pour *opérateur* « > » et pour *seuil* « 100 m ».

Ce modèle permet également de décrire comment est représenté dans la BD un objet du monde réel. Par exemple, si les rivières sont représentées en 2D½ par leur axe dans le sens de la pente, la classe « *Rivière* » sera associée à une *modélisation* avec pour *type planimétrique* « axe », pour *dimension* « 1 », pour *orientation* « vrai », et pour *type altimétrique* « 2D½, un z à chaque point ».

Ce modèle a été conçu à partir de l'étude de bases de données de l'IGN et il permet de représenter des spécifications relativement complexes. Par exemple, si la modélisation d'une rivière est une ligne si elle est peu large et une surface sinon, deux *modélisations* seront créées (pour ligne et surface), et chacune d'elle sera reliée à une *contrainte géométrique* portant sur la largeur de l'objet. De même, lorsqu'une rivière est représentée par une surface si elle est bordée par un barrage, la *modélisation* correspondante sera reliée à une *contrainte de relation topologique* (*relation* « touche », *entité en relation* « barrage »).

Ce modèle a été instancié sur des extraits de spécifications de bases de données de l'IGN (BD Carto, BD Topo). Cependant, les types de spécifications pouvant être très variés et très complexes, il mérite encore d'être testé et raffiné pour être facilement manipulable. Par exemple, dans la BD TopoPays, une route est représentée par des chaussées séparées s'il existe un séparateur augmentant d'au moins 50% la largeur de la route, ou s'il existe un séparateur de plus de 1 000 mètres de long, ou si il s'agit d'une patte d'oie d'un carrefour avec îlot directionnel de plus de 20 mètres de large.

Identifier les correspondances entre bases de données (1b)

Une fois les bases de données étudiées individuellement pour en formaliser les spécifications, il faut comprendre leurs similitudes et leurs différences, tout d'abord au niveau des schémas de données : quelle partie du schéma d'une BD (relation, classe, attribut par exemple) correspond à quelle partie du schéma d'une autre BD ? Un travail de thèse de Nils Gesbert est en cours sur ce sujet : il a pour objectif de développer des outils interactifs d'aide à la décision pour consulter, manipuler et créer les schémas des données à représentation multiple.

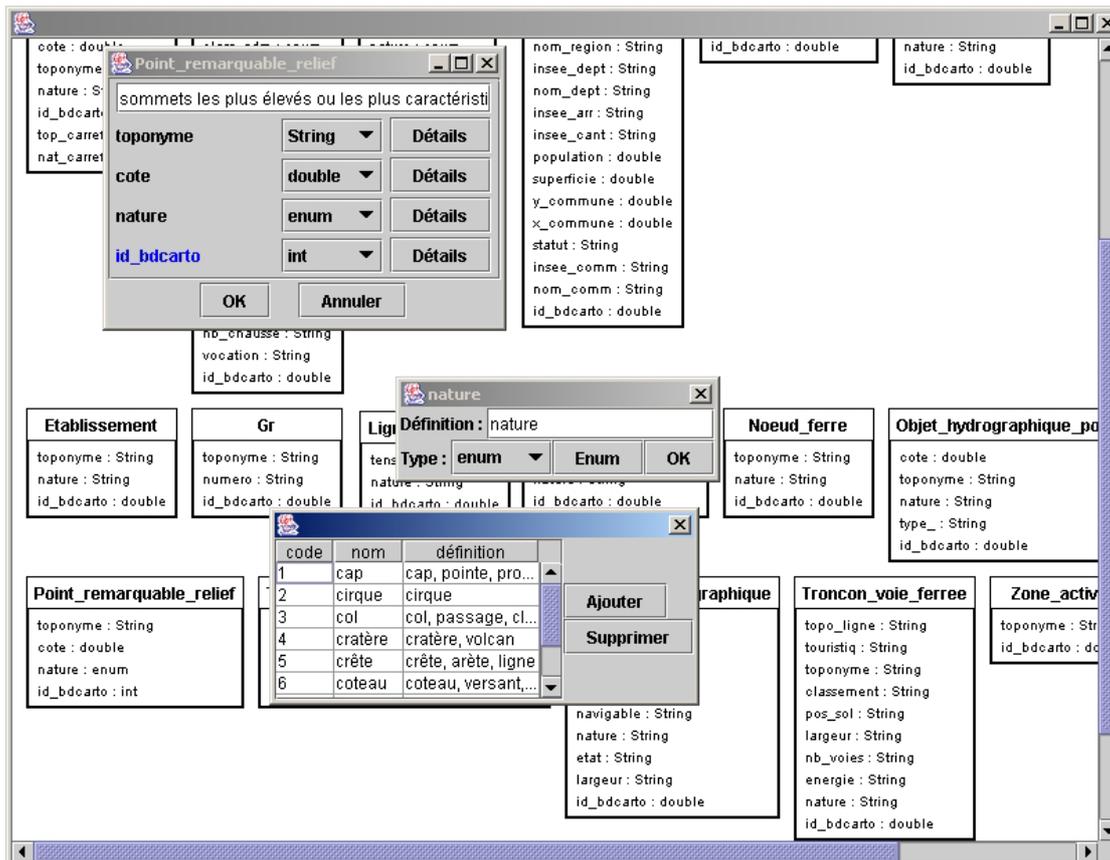


figure B.6.4 : interface de manipulation des schémas et spécifications (en cours de développement)

La figure B.6.5, page suivante, illustre cela : certaines des différences entre les données s'expliquent par des équivalences (ex. petit rond point dans BD Topo, carrefour simple dans Géoroute), d'autres par des incohérences, soit dues à des différences de mise à jour (par exemple, un carrefour en patte d'oie a été transformé en rond-point), soit dues à des erreurs de saisie vis-à-vis des spécifications (par exemple, un rond point de taille en théorie suffisante est représenté à tort comme un carrefour simple dans Géoroute).

Un des objectifs de l'action de recherche « Unification des bases de données géographiques » est donc de définir une méthodologie pour détecter et qualifier ces différences. Une première méthodologie est en cours de mise au point et fait l'objet de la thèse de David Sheeren.

Cette méthodologie qui repose sur une analyse des données, comme des schémas et des spécifications, contient schématiquement les étapes suivantes :

- formalisation des spécifications, comme décrit ci-dessus à l'étape 1a/ ;
- étude du respect des spécifications de chacune des bases individuellement, comme par exemple l'étude du respect des tailles minimales des objets représentés ;
- raffinement des spécifications réelles à partir de l'analyse des données. En effet, il existe un certain écart entre les spécifications théoriques et leur réalisation. Par exemple, une certaine tolérance implicite existe sur les tailles minimales à respecter (une route de 98 mètres pourra être représentée même si les spécifications posent une longueur minimale de 100 m). De même, des spécifications peuvent avoir une formulation floue, comme « représenter les routes importantes ». L'analyse des données peut permettre de retrouver ces spécifications « réelles » ;
- fédération de schémas, comme décrit à l'étape 1b/ ;
- appariement des données, à partir par exemple de la géométrie des objets considérés ;
- interprétation des différences. Cette étape centrale, qui qualifie les différences à partir des résultats des étapes précédentes nécessite la mise au point de bases de règles, pour laquelle l'utilisation d'apprentissage automatique à partir d'exemples est actuellement testée.

Comparaison des thèmes routier de BD Topo et GéoRoute

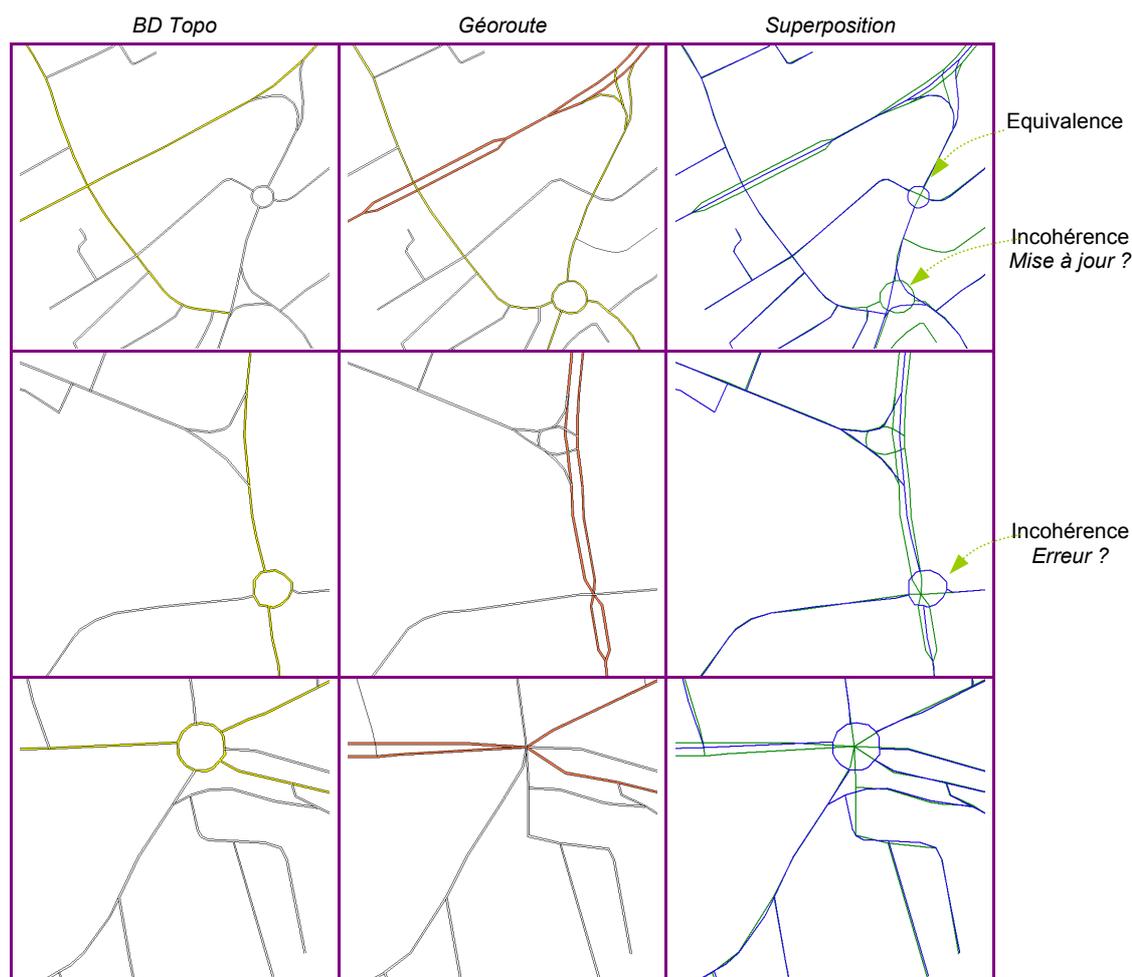


figure B.6.5 : incohérences ou équivalences ?

Intégrer les données dans la base à représentation multiple (2b)

La dernière phase du processus correspond à l'instanciation des données de la BD à représentation multiple. Il faut alors choisir quelles données représenter dans la BD et les mettre en cohérence, puisque celles-ci proviennent de différentes BD. Les choix réalisés à ce niveau dépendent des règles de correspondances entre bases (étape 1b), ainsi que de l'analyse des écarts réalisée à l'étape précédente (étape 2a). Ce travail est à plus long terme et n'est pas envisagé pour 2003 dans l'action de recherche « Unification des bases de données géographiques ».

Analyse spatiale et appariement de données

Pour pouvoir manipuler des données réelles, il est nécessaire de s'équiper d'une batterie d'outils d'analyse spatiale sur lesquels s'appuyer. En particulier des outils d'appariement sont nécessaires à plusieurs étapes du processus. L'appariement est utile à la phase 1b pour mettre en correspondance les données afin d'analyser les correspondances entre schémas. Il est aussi nécessaire à la phase 2a pour analyser les données et comprendre les différences de représentations entre les objets des bases représentant un même phénomène (donc appariés).

En nous appuyant sur les travaux effectués auparavant sur ce sujet au laboratoire COGIT, nous poursuivons la mise au point des outils d'appariement. Par exemple, la figure B.6.6, page suivante, illustre les résultats d'un processus d'appariement entre les réseaux routiers de BD Carto et GéoRoute : les zones vertes représentent les nœuds et arcs de GéoRoute appariés avec un nœud de la BD Carto, les tirets verts représentent les liens entre arcs de GéoRoute et de BD Carto.

Ce processus correspond au processus défini dans la thèse de Thomas Devogele [DEVOGELE 97], qui a été recodé et affiné en 2002. Ce processus est souvent efficace pour les carrefours simples, de ronds-points, de carrefours décalés ou de carrefours en patte d'oie, même en cas de dédoublement des chaussées dans GéoRoute (cf. premières lignes de la figure).

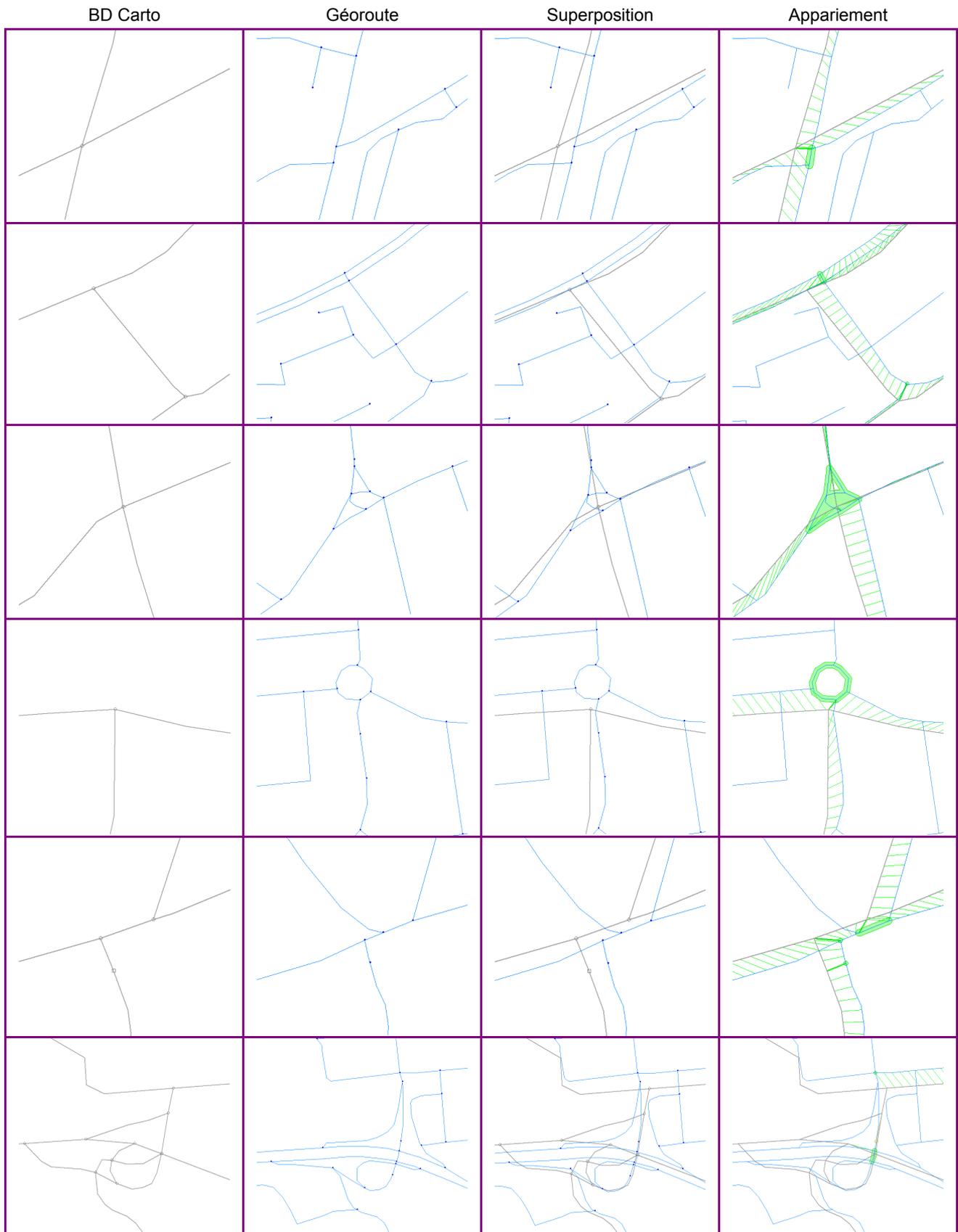


figure B.6.6 : appariement entre les réseaux routiers de BD Carto et Géoroute

Par contre, ce processus trouve ses limites lors du traitement de nombreux carrefours proches (cf. avant dernière ligne de la figure) ou d'échangeurs complexes où parfois même un appariement manuel est difficile (cf. dernière ligne de la figure). Ce dernier cas illustre le fait qu'un appariement complètement automatique est certainement impossible. Dans une optique d'utilisation de l'appariement en production, il est donc nécessaire de concevoir des outils pour évaluer et corriger interactivement un appariement réalisé de manière automatique.

Les travaux sur l'appariement au sein de l'action de recherche « Unification des bases de données géographiques » se situent à plusieurs niveaux : raffinement des processus déjà établis, étude de cas particulièrement complexes, contrôle et enrichissement des données dans le but de faciliter leur appariement, qualification plus fine des résultats de l'appariement pour faciliter leur utilisation dans différents contextes, visualisation et manipulation des résultats de l'appariement.

Conclusion

Tous les objectifs évoqués précédemment concernent la constitution de bases de données unifiées et s'appuient sur des mêmes a priori : l'unification de BD nécessite une analyse fine des spécifications des bases de données et des différences de représentation entre données. Elle nécessite également une analyse conjointe des données, des schémas et des spécifications. Nous pensons que ces analyses sont nécessaires à l'unification, mais aussi qu'elles sont sources de nombreux enseignements sur les forces et les faiblesses des bases de données actuelles.

Un autre aspect des bases de données unifiées concerne leur maintenance et leur mise à jour. Ceci fait également l'objet de travaux au laboratoire COGIT, plus particulièrement dans le cadre de l'action de recherche « *Évolution des Bases de Données* ».

Dans le futur, nous souhaitons également étudier un aspect de l'unification : l'utilisation de bases de données à représentation multiple. Plus précisément, nous désirons étudier d'un point de vue plus applicatif, l'apport de bases de données à représentation multiple pour des analyses géographiques. Cet objectif est à plus long terme car il dépend de la constitution préalable de bases de données à représentation multiple.

Publications

[BADARD 00] T. Badard : *Propagation des mises à jour dans les bases de données géographiques multi-représentation par analyse des changements géographiques*, thèse de doctorat de l'Université de Marne-la-Vallée, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-026-S-THE-TB, 2000.

[BEL HADJ ALI 01] A. Bel Hadj Ali : *Qualité géométrique des entités géographiques surfaciques. Application à l'appariement et définition d'une typologie des écarts géométriques*, thèse de doctorat de l'Université de Marne-la-Vallée, laboratoire COGIT, IGN-SR 01-013-S-THE-ABHA, 2001.

[DEVOGELE 97] T. Devogèle : *Processus d'Intégration et d'Appariement de Bases de Données Géographiques - Application à une bases de données routières multi-échelles*, thèse de doctorat de l'Université Marne-la-Vallée, laboratoire COGIT, IGN-SR 97-025-S-THE-TD, 1997.

[DEVOGELE et al 96] T. Devogèle, J. Trévisan and L. Raynal : *Building a multi-scale database with scale-transition relationships*, in Actes de SDH'96, sec. 6, pp.19-31, laboratoire COGIT, IGN-SR 96-018-S-COM-TD, 1996.

[LEMARIÉ, RAYNAL 96] C. Lemarié et L. Raynal : *Geographic data matching : First investigations for a generic tool*, in Actes de GIS/LIS 96, ACSM Annual conference and Exposition, Denver, pp. 405-420, laboratoire COGIT, IGN-SR 96-036-S-COM-CL, 1996.

[LEMARIÉ, BUCAILLE 98] C. Lemarié C. & O. Bucaille : *Spécifications d'un module générique d'appariement de données géographiques*, in Actes du 11ème congrès Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle (RFIA'98), vol. 2, pp.397-406, laboratoire COGIT, IGN-SR 98-003-S-COM-CL, 1998.

[GESBERT 02] N. Gesbert : *Recherche de concepts fédérateurs dans les bases de données géographiques*, in Actes des 6èmes journées Cassini, pp. 365 à 368, laboratoire COGIT, IGN-SR 02-022-S-COM-NG, 2002.

[MOTET 02] S. Motet : *Correspondances entre représentations*, in Revue internationale de géomatique, vol. 12, n.1/2002, pp. 9-25, laboratoire COGIT, IGN-SR 02-051-S-ART-SM, 2002.

[MUSTIÈRE 02] S. Mustière : *Description des processus d'appariement mis en œuvre au COGIT*, rapport technique, laboratoire COGIT, IGN-SR 02-026-S-RAP-SM, 2002.

[RUAS 02] A. Ruas : *Pourquoi associer les représentations des données géographiques ?* Traité IGAT (Information Géographique et Aménagement du Territoire), Information et généralisation multiple, direction : Anne Ruas, pp. 45-54, Ed : Hermès, laboratoire COGIT, IGN-SR 02-52 -S-ART-AR, 2002.

[SHEEREN 02] D. Sheeren : *L'appariement pour la constitution de bases de données géographiques multi-résolutions. Vers une interprétation des différences de représentation*, in Revue Internationale de Géomatique, vol 12, n.2/2002, p.151-168, laboratoire COGIT, IGN-SR 02-020-S-ART-DS, 2002.

[SHEEREN 02] D. Sheeren : *L'appariement pour la constitution de bases de données géographiques multi-résolutions. Vers une interprétation des différences de représentation*, in Actes des 6èmes journées Cassini, 2002, pp. 207-225, laboratoire COGIT, IGN-SR 02-021-S-COM-DS, 2002.

De plus, les rapports du Projet européen *MurMur* sont disponibles sur le site <http://lbdwww.epfl.ch/e/MurMur/>.

B.7 L'évaluation de la généralisation

Sylvain Bard

Introduction

Le laboratoire COGIT travaille depuis 1991 sur l'automatisation du processus de généralisation cartographique. Cette expérience a permis d'identifier trois étapes fondamentales pour parvenir à une généralisation automatique :

- une description du contexte spatial des objets géographiques, qui permet de déterminer ;
- un traitement algorithmique de généralisation adapté à ce contexte ;
- une évaluation du résultat de généralisation obtenu. Les deux premières étapes ont fait l'objet de nombreux travaux à l'IGN et dans la littérature, néanmoins la dernière étape reste peu étudiée [MÜLLER et al 92], [WEIBEL, DUTTON 99] (p150), [JOÃO 98]. Pourtant, l'évaluation est importante puisqu'elle constitue un contrôle du processus de généralisation automatique et une validation du résultat de généralisation.

De façon traditionnelle, ce contrôle était effectué visuellement. Le stockage de l'information géographique sous forme de base de données permet d'espérer un contrôle systématique du résultat de la généralisation grâce à l'outil informatique. Cependant, le raisonnement et l'analyse du cartographe lors de l'évaluation restent difficile à décomposer en une série de critères simples. Par exemple, la sélection du réseau routier principal sur un critère sémantique de type de route (élimination des chemins et des routes étroites) conduit à des problèmes d'accessibilité. Le chemin d'accès à une maison forestière ou bien la route étroite accédant à une vallée ne sont pas éliminés afin que le réseau routier reste cohérent. Il est donc difficile d'évaluer si la présence de tels objets est due à une erreur ou à un critère géographique contextuel.

Cet exemple montre l'importance du contexte dans la généralisation cartographique. Il existe des règles générales de généralisation qui ensuite sont adaptées au contexte de généralisation. La transposition de ces règles en spécifications de généralisation est une des difficultés de l'évaluation. Comment en effet, évaluer la qualité d'une généralisation, si la règle est modifiée à chaque contexte géographique ?

L'objectif principal de ce travail de recherche est la définition d'un modèle et d'un outil d'évaluation de la généralisation. Afin de guider le lecteur dans notre démarche, nous avons identifié les éléments essentiels d'un outil d'évaluation « idéal ». Cet outil doit comporter les éléments suivants :

- un outil de paramétrage de l'évaluation permettant la saisie des spécifications de généralisation ;
- un outil d'évaluation *proprement dit* fondé sur les spécifications de généralisation définies ci-dessus ;
- un outil de visualisation du résultat afin de vérifier la pertinence de l'évaluation ;
- un rapport d'évaluation avec des niveaux de détails différents.

La problématique

La généralisation est un processus de simplification de la représentation d'un espace géographique. Lors de cette simplification, les objets géographiques sont modifiés par des opérations de déplacement, d'agrégation, d'élimination et de caricature. Ces modifications doivent être évaluées afin de déterminer si les données conservées sont pertinentes ou non, et si ces données répondent aux besoins exprimés par l'utilisateur. Il s'agit donc de quantifier et de qualifier les modifications apportées aux données. Le problème à résoudre est illustré par la figure B.7.1 (page suivante) et se pose ainsi : *étant donné une généralisation, comment en définir la qualité ?*

Deux difficultés principales ont été identifiées : d'une part, l'existence de plusieurs solutions de généralisation possibles pour une même configuration initiale [SPIESS 95] illustrée par la figure B.7.1, et d'autre part, la difficulté d'acquérir des connaissances pour les spécifications de généralisation. La non-unicité d'une solution de généralisation pose le problème de la définition d'une généralisation de référence, si une telle référence existe.

Habituellement, lors d'une évaluation, le résultat obtenu est comparé par rapport à un résultat « idéal » *dit* de référence, l'évaluation est une mesure d'écart entre la référence et l'observation. Cependant, dans le cas de la généralisation, plusieurs références sont possibles et elles ne sont pas toutes connues. L'acquisition des connaissances nécessaires à l'évaluation conditionne le paramétrage de l'évaluation, par exemple, cela permet de définir le seuil de lisibilité à 400 m² pour la taille minimale d'un bâtiment au 1 : 50 000. Néanmoins, l'œil est incapable de différencier un bâtiment de 420 m² et d'un bâtiment de 380 m² à cette échelle. Il apparaît nécessaire de coupler chaque spécification avec une valeur de tolérance.

La première partie de cet article est consacrée à la définition du fondement principal de l'évaluation proposée, à savoir, l'évolution de référence. Autour de ce principe nous avons développé une méthodologie d'évaluation exposée dans la seconde partie. Pour finir, nous présentons les résultats d'application de cette méthode d'évaluation à un jeu de données test tiré de la BD Topo, généralisée au 1 : 50 000.

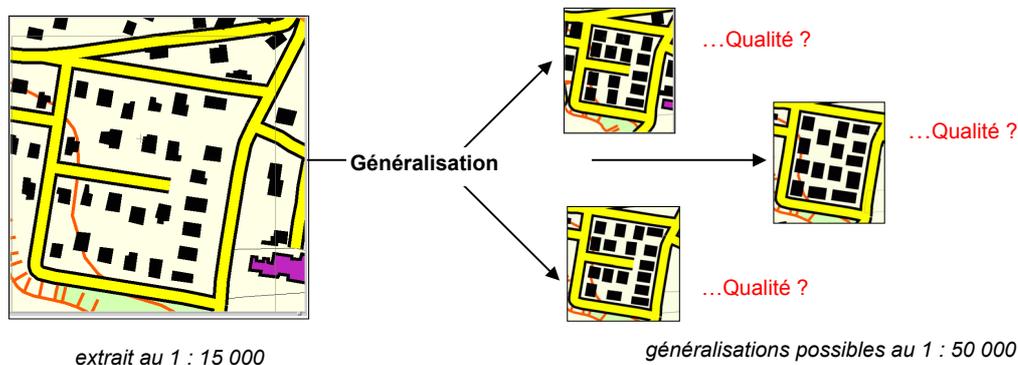


figure B.7.1 : généralisation d'un îlot urbain : non unicité du résultat

Un principe : la définition d'une fonction d'évolution de référence

La définition des spécifications de généralisation est une des principales difficultés dans la mise en œuvre d'une évaluation de la généralisation. Ces spécifications sont de deux ordres : cartographiques et utilisateurs. Les spécifications cartographiques sont liées à l'échelle finale de la généralisation et contraignent la taille des symboles cartographiques associés aux objets représentés, par exemple : la taille minimale d'un bâtiment. Les spécifications de l'utilisateur correspondent à la définition des points importants à évaluer selon un utilisateur spécifique, par exemple : fixer la tolérance du déplacement maximal pour les routes à 50 m.

Pour ce faire, nous proposons l'utilisation de fonctions d'évolutions. Une fonction d'évolution de référence est l'évolution souhaitée et acceptable d'une propriété d'un objet géographique au cours de la généralisation. Une propriété est une caractéristique géographique d'un objet. Plusieurs niveaux d'analyse spatiale sont nécessaires pour appréhender les propriétés de l'espace géographique. Les propriétés sont décrites à l'aide de mesures. Par exemple, la propriété de taille d'un bâtiment est mesurée par sa surface.

Pour chaque propriété identifiée d'un objet géographique, une valeur théorique est calculée à partir de la fonction d'évolution de référence définie pour cette propriété. Ensuite, l'écart entre la valeur théorique et la valeur observée (i.e. généralisée) est calculé. Cet écart est interprété en fonction des tolérances définies pour chaque propriété dans les spécifications de l'utilisateur.

La figure B.7.2 illustre ce principe d'évolution de référence pour trois propriétés: la position, le taux de concavité et la taille. La position est une propriété qui ne doit pas être trop modifiée, c'est pourquoi la courbe de référence est une courbe du type : « position initiale égale position généralisée ». Le taux de concavité (rapport de la surface de l'objet sur la surface de l'enveloppe convexe) est une mesure de la propriété de forme. Plus ce taux est faible, plus la forme de l'objet est complexe.

L'évolution de référence souhaitée est une faible simplification des objets très complexes (partie gauche de la courbe), c'est-à-dire que l'on caricature les objets de forme remarquable, et une simplification complète de la forme des objets de forme peu complexe (partie droite de la courbe), c'est-à-dire que ces objets sont de formes convexes après généralisation.

L'évolution de la propriété de taille d'un bâtiment, est un grossissement au delà d'un seuil de lisibilité pour les bâtiments non lisibles à l'échelle finale, un grossissement pour les bâtiments proches de ce seuil (partie de la courbe de référence en escalier) et une conservation de taille pour les bâtiments situés très au delà de ce seuil avant généralisation (partie droite de la courbe de référence où la taille initiale est identique à la taille généralisée).

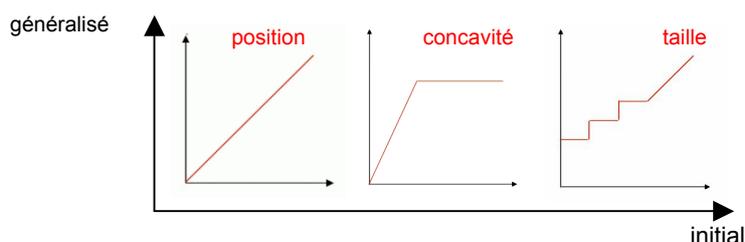


figure B.7.2

Exemples de fonction d'évolutions de référence pour les propriétés de position, concavité et taille.

La méthode d'évaluation proposée

La méthode d'évaluation proposée se fonde sur les spécifications de généralisation et les évolutions de référence définies précédemment.

Cette méthode se décline sous la forme d'un enrichissement du schéma de données et sur trois étapes fondamentales pour l'évaluation :

- la caractérisation ;
- l'évaluation ;
- l'agrégation. Nous détaillons successivement ces composantes. Une formalisation détaillée a été proposée dans [BARD 02].

L'enrichissement du schéma de données

La généralisation peut être vue comme un processus de changement d'état, c'est-à-dire le passage d'un état initial à un état final. Pendant ce processus, les données passent par des états intermédiaires qui ne sont pas évalués dans ce travail puisque nous ne travaillons pas sur le processus.

L'enrichissement du schéma de données proposé correspond à une définition explicite de ces deux états par l'intermédiaire d'une classe d'objets géographiques généralisés et non généralisés. Deux autres classes spécifiques à l'évaluation sont également ajoutées : une classe de caractérisation et une classe d'évaluation.

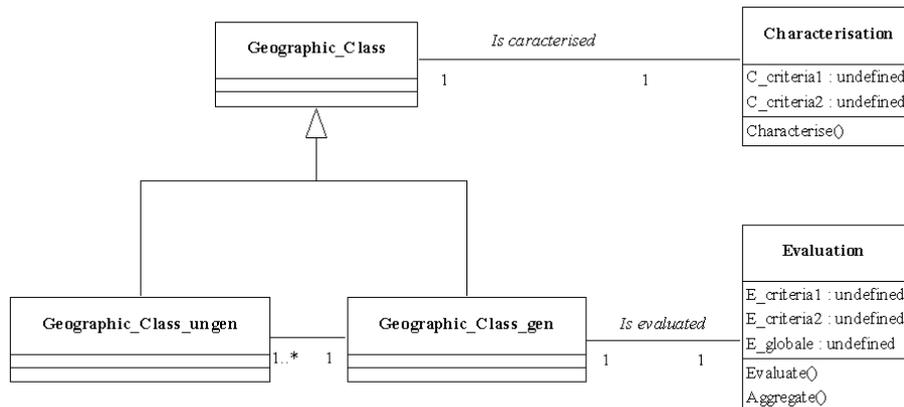


figure B.7.3 : modèle d'évaluation

Classe Géographique

Cette classe peut être une classe d'objets non généralisés : Classe_Géographique_nongen, ou bien une classe d'objets généralisés : Classe_Géographique_gen. Avant la généralisation les objets appartiennent tous à la classe d'objets non généralisés, après généralisation, les objets conservés font partie de la classe d'objets généralisés. Pendant le processus de généralisation, certains objets sont éliminés, d'autres agrégés. Ainsi, à un objet généralisé peut correspondre un ou plusieurs objets non généralisés.

Cela permet un appariement relativement simple des objets, il suffit de rajouter un lien qui sera conservé lors de la généralisation. Les classes géographiques comprennent les objets micro (un objet géographique), ainsi que méso (groupes d'objets). Ces derniers sont nécessaires non seulement à la généralisation mais aussi à son évaluation (relation n-m).

Classe Caractérisation

Cette classe correspond à la description de l'information portée par les objets généralisés et non généralisés. Cette classe est associée à la classe Géographique, cela permet par relation d'héritage la caractérisation des objets généralisés et non généralisés. Une méthode de caractérisation est associée à cette classe, cette méthode permet d'instancier les attributs de cette classe qui correspondent aux propriétés étudiées (e.g. la taille, la forme, la position).

Classe Evaluation

Cette classe porte l'information d'évaluation de la qualité de la généralisation effectuée, c'est pourquoi elle est associée uniquement à la classe d'objet généralisés. Deux types d'informations sont décrits dans cette classe. Une information détaillée qui correspond au résultat d'évaluation selon un critère, et une information générale qui résulte d'une agrégation des informations détaillées portées par l'objet.

Deux méthodes, évaluation et agrégation ont été définies sur cette classe. La méthode évaluation permet d'instancier les attributs d'évaluation, c'est-à-dire le résultat d'évaluation pour un critère. La méthode agrégation permet d'instancier l'attribut d'évaluation globale de la qualité de l'objet généralisé. Ces deux méthodes permettent de calculer la qualité de la généralisation.

La caractérisation

La caractérisation correspond à la description des objets géographiques à l'état initial et généralisé selon une série de critères caractéristiques de l'objet. Ces critères peuvent être géométriques, sémantiques ou topologiques. Chaque critère est associé à une ou plusieurs mesures et dépend du niveau d'analyse de l'information géographique auquel appartient l'objet. Ces niveaux sont le micro, le méso et le macro [RUAS 99]. Le niveau micro correspond à la description d'un objet indépendamment des autres objets selon ses propriétés.

Par exemple : un bâtiment décrit par sa forme, sa position, son orientation et sa taille. Un objet méso correspond à la description d'un groupe, ce groupe peut être formé d'objets micro (un quartier est composé d'un groupe de bâtiments) ou d'objets méso (une ville regroupe des quartiers). Le niveau macro décrit une population d'objets (l'ensemble des bâtiments, l'ensemble des routes). Par exemple, un bâtiment est caractérisé par ses propriétés de taille, position, orientation, forme et granularité.

À chaque propriété est associée une mesure particulière, respectivement la surface, les coordonnées du centre de gravité, l'orientation des murs, l'élongation (rapport largeur sur longueur) et le taux de concavité (rapport surface sur surface de l'enveloppe convexe), et la taille du plus petit côté. Pour un bâtiment donné, cela correspond à : taille 250 m², position (872 000;134 000), orientation 12°, élongation 0,91 (forme), taux de concavité 0,8 (forme) et granularité 4 m.

L'évaluation

L'évaluation correspond au calcul et à l'interprétation de l'écart entre le résultat observé et le résultat théorique (de référence). La référence est définie à partir des évolutions de référence spécifiées par l'utilisateur et de la caractérisation initiale de l'objet. Cette référence est comparée à la valeur de caractérisation à l'état généralisé. L'écart entre les deux valeurs est ensuite interprété selon les spécifications de généralisation (cf. figure B.7.4).

Si l'écart est inférieur à une valeur d'acceptation définie en fonction de la tolérance spécifiée par l'utilisateur, alors l'interprétation est que la généralisation est de bonne qualité. Si l'écart est supérieur au seuil de refus, alors l'interprétation est que la généralisation est de mauvaise qualité. Sinon, la généralisation est considérée comme tolérable, c'est-à-dire qu'elle est acceptée mais ne constitue pas une des meilleures solutions.

Par exemple : considérons l'évaluation de l'écart du critère de taille. La valeur théorique est de 425 m², la valeur observée de 380 m². L'écart par rapport à la valeur théorique est donc de 45 m². La tolérance définie par l'utilisateur dans les spécifications est de 30 m², la valeur de refus de 60 m². Dans cet exemple, l'écart se situe dans la zone de tolérance. L'interprétation de l'évaluation de la propriété de taille est : tolérance de cette généralisation.

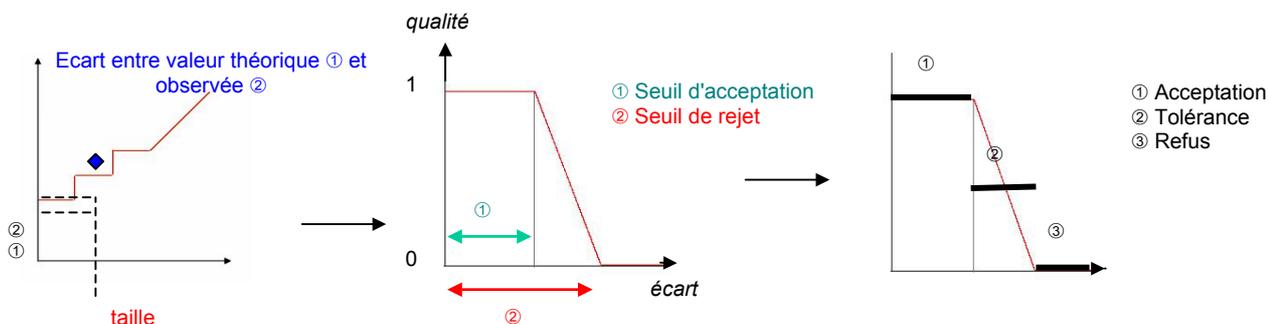


figure B.7.4 : fonction d'évaluation et d'interprétation

L'agrégation

L'agrégation a pour objectif de fournir un résultat synthétique de l'évaluation. Ce résultat est calculé à différents niveaux d'analyse imbriqués les uns dans les autres. Le premier niveau intéressant est le niveau d'un objet géographique (niveau micro et méso). Nous avons vu, en effet, que l'évaluation portait sur des propriétés caractéristiques de l'objet (sa forme, sa position, sa taille). L'agrégation consiste alors à agréger ces valeurs d'évaluation en une valeur représentative de la qualité de la généralisation effectuée sur cet objet, cf. équations 1 et 2. L'objectif est d'avoir un résultat simple d'évaluation pour chacun des objets géographiques. Le second niveau concerne ensuite une agrégation des résultats d'évaluation par classe d'objets (niveau macro).

L'objectif est de se faire une idée de la qualité de la généralisation sur chacune des classes d'objets géographiques à partir des résultats d'agrégation précédents sur un objet, cf. équation 3. Par exemple : évaluer la qualité de généralisation des objets de la classe routes ou de la classe bâtiments. Le troisième niveau est le niveau d'agrégation le plus général puisqu'il concerne l'agrégation des évaluations de la qualité de la généralisation de chaque classe d'objets en vue d'obtenir une évaluation globale de la carte généralisée, cf. équation 4.

$$Qualité\ micro = \sum_{objet} (Évaluations) \quad (1)$$

$$Qualité\ méso = \sum_{objet} (Évaluations) \quad (2)$$

$$Qualité\ macro = \sum_{objet} (Qualité\ micro, Qualité\ méso) \quad (3)$$

$$Qualité\ globale = \sum_{objet} (Qualité\ macro) \quad (4)$$

La principale difficulté consiste à déterminer le poids de chaque critère pour l'évaluation. Il s'agit de définir une hiérarchie d'importance entre critères. Pour ce faire, nous utilisons des méthodes d'apprentissage supervisé [MITCHELL 97]. À partir de l'expertise de plusieurs cartographes sur une évaluation de généralisation, nous apprenons des règles de décision sur un extrait de données. Ces règles d'agrégation sont ensuite appliquées à l'ensemble du jeu de données à évaluer.

La représentation des résultats d'évaluation : visualisation et rapport

L'évaluation peut être couplée avec un module de visualisation des résultats [BEARD, BUTTENFIELD 99]. L'intérêt de ce module est la visualisation des zones où la généralisation n'est pas satisfaisante (contexte particulier, erreur systématique) pour contrôler si l'expert est d'accord avec le résultat automatique. Cela permet également une reprise interactive des objets mal généralisés.

Un rapport d'évaluation est également généré. Ce rapport se présente sous la forme d'une évaluation générale, i.e. haut niveau, qui peut se détailler jusqu'au niveau d'un objet, i.e. bas niveau. L'évaluation de la généralisation est analogue au contrôle technique d'une automobile, où le résultat peut être satisfaisant (évaluation globale), mais avec un témoin d'usure des pneus à moitié usés et une faiblesse notée sur l'amortisseur avant gauche (évaluation spécifique).

Application et résultats

Le jeu de données test utilisé est un extrait de la BD Topo. L'échelle initiale est le 1 : 15 000, l'échelle de généralisation est le 1 : 50 000. Le prototype de généralisation utilisé pour générer le jeu de données généralisées est le prototype AGENT [AGENT 99]. Le module d'évaluation de la généralisation a été implémenté dans le SIG Lamps2 de la société LaserScan. Le langage de programmation utilisé est le Lull (Lamps2 User Language).

L'interface de saisie des spécifications de généralisation que nous avons développée se compose de quatre parties. La première recense des informations générales sur le jeu de données à évaluer, telle que les échelles initiales et finales (cf. figure B.7.5, page suivante). La seconde partie est constituée d'un bouton déclenchant le chargement du schéma d'évaluation proposé. La troisième partie concerne la saisie des spécifications cartographiques et des seuils de tolérance, tels que la taille minimale ou le déplacement maximum autorisé. La quatrième partie permet de définir pour chaque critère d'évaluation une fonction d'évolution de référence. Enfin, les deux derniers composants servent à déclencher l'évaluation et à générer le rapport d'évaluation.

L'intérêt d'un tel outil est de déterminer des seuils d'évaluation par une série de tests successifs jusqu'à ce que le résultat d'évaluation converge vers un résultat cohérent. Par cette méthode, l'acquisition des connaissances relatives aux spécifications de généralisation est plus aisée.

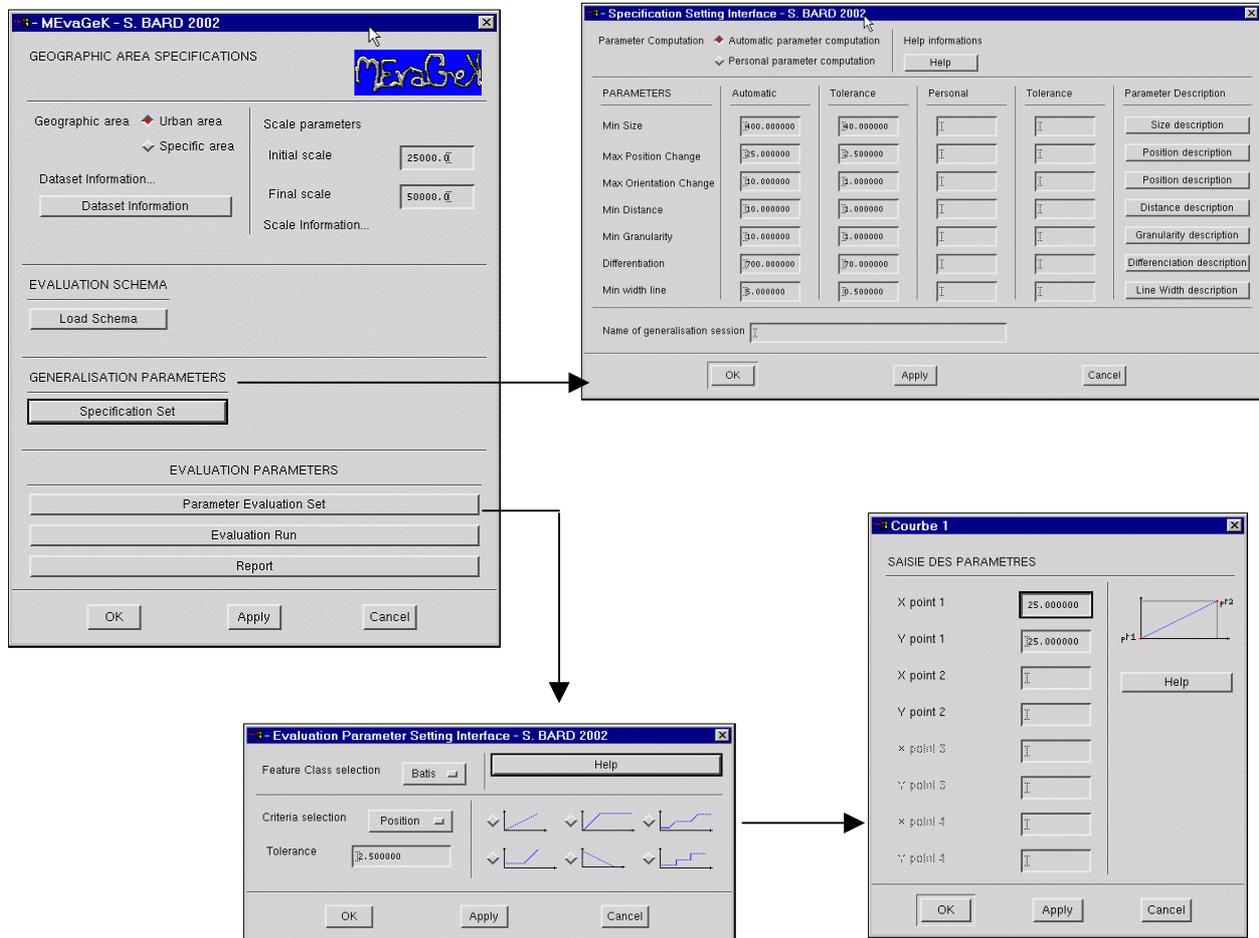


figure B.7.5

Interfaces de saisie des spécifications de généralisation, de chargement du schéma et de lancement de l'évaluation.

L'interface de visualisation a été développée pendant le stage au laboratoire COGIT de Bernard Beauvisage, dans le cadre du DESS de Cartographie, option cartographie numérique de l'École Nationale des Sciences Géographiques. Cette interface permet de contrôler les objets dont la généralisation est de mauvaise qualité selon un critère d'évaluation choisi. Ici, nous avons uniquement représenté l'évaluation de la taille des bâtiments (niveau micro). L'interface permet d'effectuer le même type de représentation pour les autres critères d'évaluation, pour les autres niveaux d'évaluation (méso et macro), ainsi que des représentations simultanées d'une évaluation micro et méso sur une même zone (représentation combinée de l'évaluation de la taille : micro, et de la densité : méso).

Les bâtiments considérés comme bien généralisés sont représentés par une couleur claire, ceux considérés comme mal généralisés par une couleur foncée. Notons que ce sont les bâtiments qui étaient de taille importante à l'état initial, qui sont détectés comme de généralisation non satisfaisante. En fait, ces bâtiments n'ont pas varié en taille et la relation d'ordre entre les bâtiments n'a pas été bien préservée dans cet exemple (effet de seuil).

Conclusions et perspectives

Les travaux présentés dans cet article contribuent à l'évaluation de la qualité des résultats d'une généralisation automatique. La méthodologie d'évaluation proposée est suffisamment générale pour être adaptée à tout type d'évaluation. Après, le paramétrage des fonctions de référence dépend de l'application et des spécifications de l'utilisateur. C'est pourquoi nous avons proposé un module de saisie de ces spécifications pour guider l'utilisateur.

Les perspectives de ce travail concernent la mise en œuvre d'évolutions de référence pour les distributions de valeurs associées à une propriété, les traitements d'évaluation complexes, et l'utilisation de fonction de tolérance « floues » :

- la première perspective consiste à déterminer comment doit évoluer une distribution de valeurs pour une propriété en fonction de spécifications utilisateurs. La définition de ces fonctions d'évaluation de référence pour les distributions concerne l'évaluation du niveau d'analyse méso (groupes d'objets), par exemple : l'évaluation de la distribution des tailles de bâtiments dans un îlot urbain ;

- la seconde concerne, l'évaluation de la généralisation dans le cas où à un objet généralisé correspondent plusieurs objets initiaux (cas des agrégations, par exemple). Nous envisageons d'intégrer une notion de représentativité de l'état initial par l'objet généralisé ;
- enfin, la dernière perspective concerne l'utilisation de fonction de tolérances « floues » pour une meilleure traduction des spécifications de généralisation. En effet, dans le cadre de l'évaluation de la généralisation nous sommes d'accord pour définir ce que nous jugeons de bonne qualité et ce que nous jugeons de mauvaise qualité. Par contre de nombreux cas sont en position intermédiaire et sont difficiles à évaluer. La logique dite floue permet une meilleure appréciation des limites entre objets.

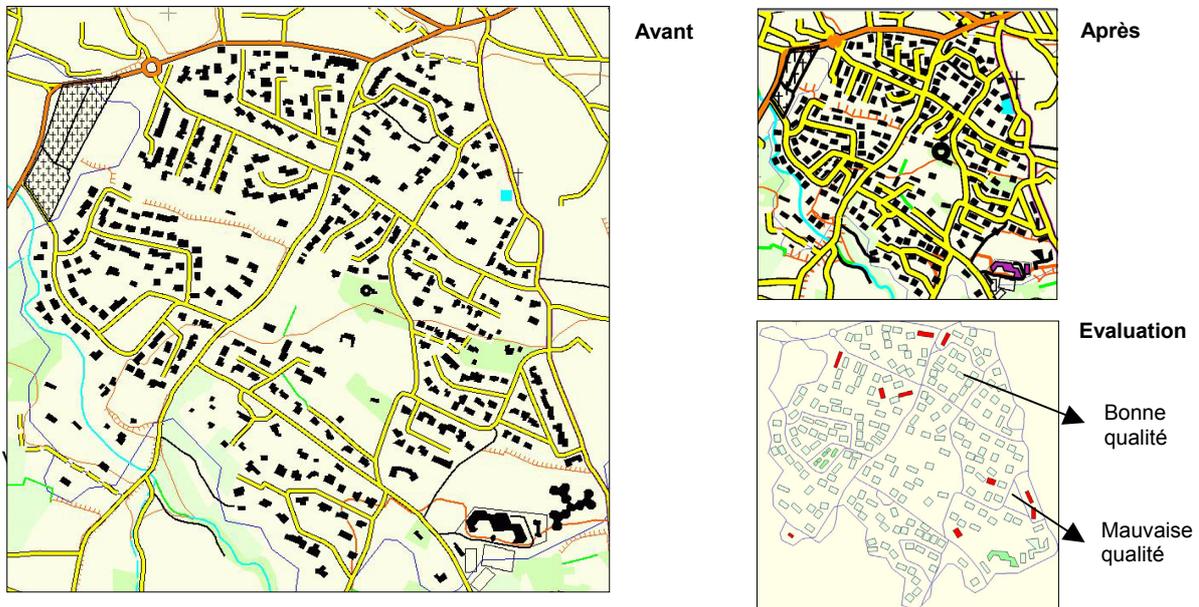


figure B.7.6 : exemple de généralisation et évaluation selon le critère de taille

Références

- [AGENT 99] *Selection of basic measures : Report DC1 of the AGENT project*, ESPRIT/LTR/24939, 1999.
- [BEARD, BUTTENFIELD 99] K. Beard and B. Buttenfield : *Detecting and evaluating errors by graphical methods*, in Longley, Goodchild, Maguire & Rhind (eds) *Geographical Information Systems*. Second edition, vol. 1: 219-233, 1999.
- [JOÃO 98] E.M. João : *Causes and consequences of map generalization*, Taylor and Francis (Eds) : London (UK), 1998.
- [MITCHELL 97] T.M. Mitchell : *Machine Learning*, McGraw-Hill International Editions, Singapour, 1997.
- [MÜLLER et al 92] J.-C. Müller et al : *Generalization : state of the art and issues*, in *GIS and Generalization : methodology and practise*, London (UK), Taylor & Francis (Eds) : 257 pages, 1992.
- [SPIESS 95] E. Spiess : *The need for generalization in a GIS environment*, in *GIS and Generalization : methodology and practise*, Taylor & Francis (Eds) : London (UK) : 31-46, 1995.
- [WEIBEL, DUTTON 98] R. Weibel and G. Dutton G : *Generalizing spatial data and dealing with multiple representations*, in Longley, Goodchild, Maguire & Rhind (eds) *Geographical Information Systems*, second edition, vol. 1: 125-155, 1998.

Publications

- [BARD 01] S. Bard : *La dérivation de bases de données géographiques, vers une évaluation des données géographiques après généralisation*, in Actes des journées Cassini, Montpellier, pp. 57-68, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-022-S-COM-SB, 2001.
- [BARD 02] S. Bard : *L'évaluation qualité de données géographiques après une généralisation cartographique*, rapport de pré-soutenance de thèse, Université Paris-6, laboratoire COGIT, IGN-SR-02-050-S-RAP-SB, 2002.
- [BARD 02] S. Bard : *Quality Assessment of Generalised Geographical Data*, in Proceedings of the 5th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences (Accuracy'02), Gary J. Hunter and Kim Lowell (Eds), Melbourne (Australie), laboratoire COGIT, IGN-SR-02-014-S-COM-SB, 2002.

[BARD, MUSTIÈRE 01] S. Bard and S. Mustière : *Revision of cartographic generalisation rule bases funded on interactive alteration analysis*, in Proceedings of 20th International Cartographic Conference, Beijing (China), laboratoire COGIT, IGN-SR-01-031-S-COM-SB, 2001.

[BEAUVISAGE 02] B. Beauvisage : *Sémiologie pour la représentation de la qualité d'une généralisation*, rapport de stage de DESS « SIG et cartographie », Université de Paris-1/ENSG, laboratoire COGIT, IGN-SR-02-002-S-STA-BB, 2002.

[RUAS 99] A. Ruas : *Modèle de généralisation de données géographiques à base de contraintes et d'autonomie*, thèse de doctorat en Sciences de l'Information Géographique, Université de Marne-la-Vallée, laboratoire COGIT, IGN-SR-99-009-S-THE-AR, 1999.

B.8 Coordination multi-agents pour la généralisation automatique

Cécile Duchêne

Introduction

La généralisation de données géographiques est l'opération qui vise à simplifier des données géographiques lorsqu'elles sont trop détaillées pour l'utilisation qu'on veut en faire. La généralisation intervient notamment dans un but cartographique, lorsque l'on souhaite produire une carte à partir d'une base de données géographiques vectorielle très détaillée. On modifie alors, en le simplifiant, le contenu de la base de données géographiques, de manière à obtenir une *base de données cartographique* [WEIBEL, DUTTON 99] correspondant aux spécifications de la carte : échelle, symboles des objets, etc. On peut ensuite afficher la base de données cartographique à l'écran avec l'échelle et les symboles voulus (carte numérique), ou l'imprimer pour obtenir une carte papier. Ce processus est illustré en figure B.8.1.

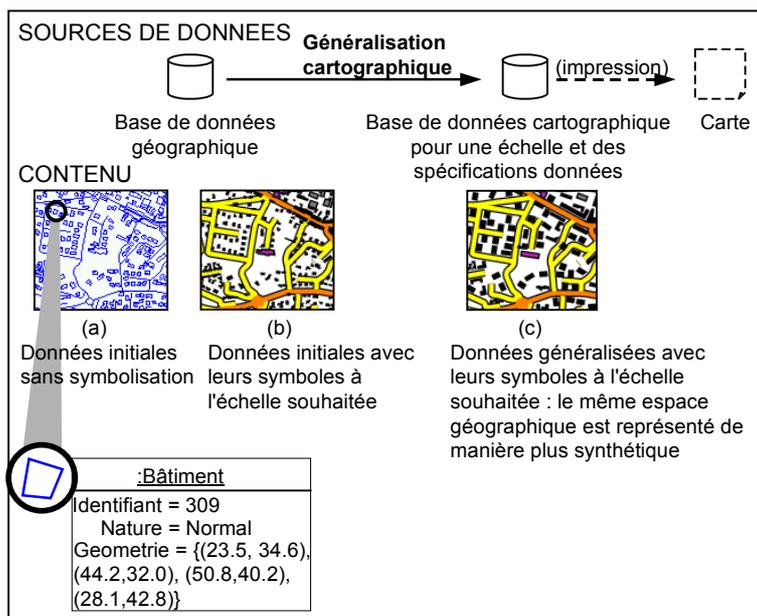


figure B.8.1 : généralisation cartographique d'une base de données géographique

Nous travaillons sur l'automatisation du processus de généralisation cartographique à partir d'une base de données vectorielle. Cette automatisation est nécessaire pour pouvoir produire différentes séries de cartes, ainsi que des cartes « à la carte », à partir d'une même base de données géographique détaillée. Notre travail porte plus précisément sur la généralisation automatique de données topographiques issues d'espaces ruraux.

L'approche que nous proposons est basée sur une technique du domaine de l'intelligence artificielle appelée « Systèmes Multi-Agents ». Le laboratoire COGIT de l'IGN a participé de 1997 à 2000 à un projet européen, le Projet AGENT, sur ce thème [DUCHÊNE, RUAS 01]. Notre travail vise à étendre les techniques mises en œuvre lors du Projet AGENT pour améliorer les résultats obtenus. Nos expérimentations portent sur des données issues de la BD Topo, base de données de résolution métrique de l'Institut Géographique National, pour produire des cartes à moyenne échelle (1 : 25 000 à 1 : 50 000).

Cet article présente notre approche pour la généralisation de données topographiques rurales et le système en cours de réalisation basé sur cette approche. Dans une première partie, nous positionnons notre travail par rapport aux autres travaux du domaine de la généralisation automatique, notamment le Projet européen AGENT. La seconde partie décrit les principes de notre approche. Enfin, nous présentons les premiers résultats obtenus et évoquons les perspectives envisagées.

Contexte et objectifs

Contraintes et conflits cartographiques

Dans une base de données cartographique, les objets doivent respecter un certain nombre de *contraintes cartographiques*. Une contrainte cartographique peut concerner un objet isolément (e.g. pour qu'un bâtiment représenté par une surface soit lisible, sa taille doit être suffisamment grande et son tracé ne doit pas être trop détaillé). Au contraire, certaines contraintes concernent plusieurs objets (e.g. le symbole d'une route ne doit pas se superposer à celui d'une maison). Lorsqu'une contrainte cartographique n'est pas respectée, on est en présence d'un *conflit cartographique*.

Les contraintes cartographiques guident le processus de généralisation : le cartographe s'attache à résoudre les conflits cartographiques présentés par les données d'origine, sans en faire apparaître de nouveaux. Certaines contraintes sont à l'origine de la généralisation parce qu'elles ne sont pas respectées par les données d'origine (taille des objets, superpositions entre symboles). D'autres contraintes traduisent le fait que la généralisation ne doit pas trop dégrader les données : elles sont relatives à la comparaison entre la base de données à un instant du processus et la base de données d'origine qui sert de référence. Ces contraintes sont respectées par les données d'origine, mais peuvent être violées en cours de généralisation, donnant ainsi naissance à des conflits. Comme les contraintes qui provoquent la généralisation, elles peuvent concerner un seul objet (e.g. maintien de la position et de la forme générale), ou plusieurs objets (e.g. maintien de leurs positions relatives). La figure B.8.2 montre quelques exemples de contraintes cartographiques.

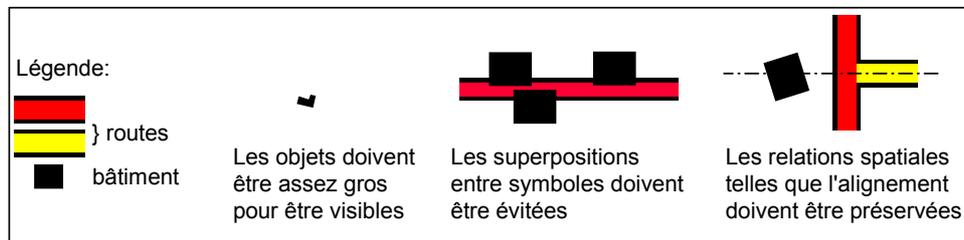


figure B.8.2 : exemples de contraintes cartographiques

Outils existants

Des recherches antérieures, menées pour partie au laboratoire COGIT de l'IGN, ont permis de mettre au point un certain nombre d'outils dédiés à la généralisation automatique :

- des algorithmes de mesure (outils d'analyse spatiale), permettant d'analyser les caractéristiques des objets géographiques et de détecter les conflits cartographiques (e.g. description des routes [PLAZANET 96], de l'espace urbain [BOFFET 02]) ;
- des algorithmes de transformation, pour résoudre les conflits cartographiques en modifiant la géométrie ou l'agencement des objets (e.g. algorithmes de dilatation d'un bâtiment, d'ouverture d'un tronçon de route en épingle à cheveux [MUSTIÈRE 98], d'élimination et réorganisation d'objets au sein d'un groupe [MÜLLER, WANG 92], [RUAS 98]).

Chaque algorithme est, en général, dédié à la détection ou à la résolution d'un conflit particulier. Un test réalisé en 1997-1999 montre que ces algorithmes donnent de très bons résultats lorsqu'ils sont choisis et appliqués de manière interactive pour généraliser un jeu de données [RUAS 01]. Le problème est à présent de savoir où et quand appliquer le bon algorithme de transformation en fonction des conflits détectés. Plusieurs travaux ont déjà été menés sur ce problème d'enchaînement des algorithmes, pour différents types de données et avec différentes approches. Notre travail s'inscrit également dans cette problématique, dans le cadre de données topographiques rurales. Nous nous appuyons sur les algorithmes de mesure et de transformation existants.

Approche générale : l'approche du projet européen AGENT et ses limites

Les concepts d'agent et de systèmes multi-agents appartiennent au domaine de l'Intelligence Artificielle [FERBER 95]. Le concept d'agent est une extension du concept d'objet (au sens programmation orientée objet) utilisé en informatique. Un agent peut être défini grossièrement comme un objet qui poursuit un but et qui, pour ce faire, a une certaine autonomie d'action et est capable d'interagir avec les autres agents du système.

L'approche générale de la généralisation dans laquelle nous nous situons a été proposée par [RUAS 99] et utilisée dans le cadre du Projet européen AGENT (projet Esprit/LTR/24939) [BARRAULT et al. 01], [DUCHÊNE, RUAS 01]. Elle consiste à faire des objets géographiques contenus dans la base de données (routes, rivières, bâtiments, etc) les entités décisionnelles du système de généralisation. Ainsi, chaque objet géographique devient un agent, dont le but est de satisfaire au mieux l'ensemble de ses contraintes cartographiques.

Pour cela chaque agent dispose de capacités :

- d'introspection, pour analyser son état interne et détecter ses conflits cartographiques ;
- d'action, pour choisir et s'appliquer des algorithmes de transformation adaptés à ses conflits ;
- d'évaluation, pour contrôler l'évolution de son état en fonction des actions réalisées et revenir en arrière pour essayer autre chose si besoin est.

De plus, dans l'approche du projet européen AGENT, on considère plusieurs niveaux d'agents : ceux qui correspondent à un objet géographique isolé, appelés agents *micro*, mais aussi des agents *méso*, correspondant à un groupe d'objets spatialement organisés: une ville, un groupe de bâtiments alignés, un îlot urbain (ensemble de bâtiments entourés par un cycle minimal de rues, en d'autres termes un « pâté de maisons »).

Il peut y avoir plusieurs niveaux de groupes emboîtés, ainsi une ville est constituée d'îlots urbains qui sont eux-mêmes constitués de bâtiments. Les agents méso ne correspondent pas à des objets existant initialement dans une base de données géographiques: il faut les créer. Ils permettent de généraliser ensemble des objets géographiques qui forment un tout. Dans l'approche du projet AGENT, un agent (micro ou méso) ne peut appartenir qu'à un seul agent méso (e.g. un bâtiment ne peut pas appartenir à plusieurs îlots urbains). L'espace est ainsi structuré en une hiérarchie pyramidale (figure B.8.3).

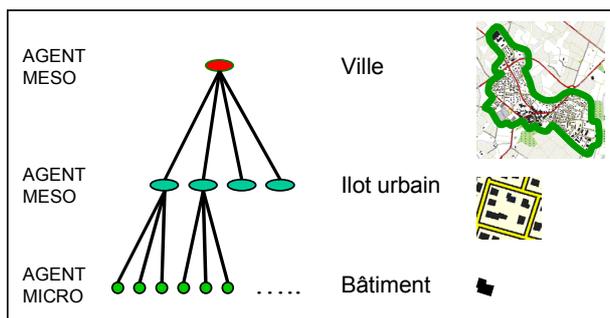


figure B.8.3 : structure hiérarchique pyramidale de l'approche du projet AGENT

Dans le modèle AGENT, un agent n'est responsable que des contraintes qui lui sont internes. Les contraintes impliquant plusieurs agents sont résolues au niveau de l'agent méso contenant ces agents. Par exemple, un conflit de superposition entre une route et un bâtiment sera traité par l'agent « îlot urbain » contenant la route et le bâtiment, qui appliquera un algorithme de déplacement à l'ensemble de ses bâtiments pour résoudre le conflit. Les interactions entre agents n'ont lieu que d'un agent méso vers ses composants (e.g. le méso peut donner l'ordre à un micro de s'éliminer).

Cette organisation pyramidale donne de bons résultats pour la généralisation de l'espace urbain, qui présente naturellement une structure hiérarchique : en ville, les rues structurent de fait l'espace en îlots disjoints au sein desquels les bâtiments doivent être réorganisés. En revanche, l'espace rural, moins dense et plus varié en types d'objets et de configurations spatiales, ne présente pas naturellement une telle structure pyramidale (figure B.8.4). Les objets géographiques y partagent plus souvent des contraintes deux à deux. Il est difficile d'y distinguer des groupes d'objets disjoints, tels qu'un objet d'un groupe ne partage aucune contrainte avec un objet d'un autre groupe.

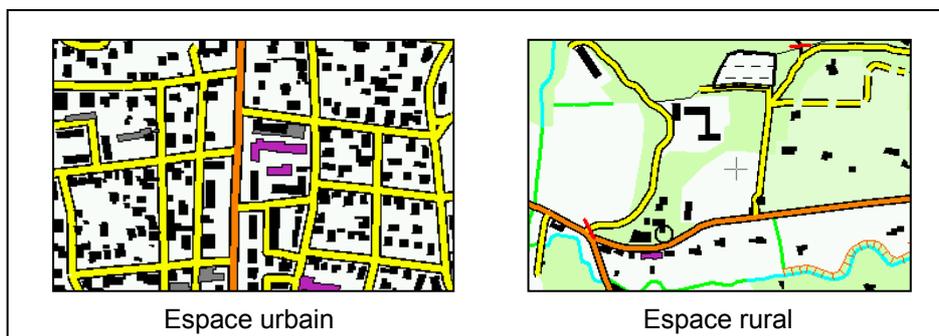


figure B.8.4 : contrairement à l'espace urbain, l'espace rural ne présente pas une structure hiérarchique évidente

Nos objectifs

L'objectif de notre travail est de dépasser les limites de l'organisation hiérarchique pyramidale du modèle AGENT pour la généralisation des zones rurales, peu denses et hétérogènes. Pour cela nous proposons une autre organisation des agents, de manière à traiter les *contraintes relationnelles*. Une contrainte relationnelle est une contrainte qui porte sur une relation entre deux objets géographiques, par exemple la contrainte qui interdit la superposition des symboles.

Dans notre approche, nous considérons *a priori* un seul niveau d'agents. Pour traiter une contrainte relationnelle entre deux agents, nous nous proposons d'utiliser des interactions bilatérales entre ces agents. On évite ainsi le recours systématique à un agent de niveau supérieur, qui n'est pas toujours qualifié pour la gestion de ce type de contrainte et qui ajoute une certaine rigidité au système.

Les contraintes relationnelles sont traitées directement par les agents sur lesquels elles portent, de la même manière que le sont les contraintes internes à un agent.

Toutefois, une contrainte relationnelle est un peu plus compliquée à traiter qu'une contrainte interne à un agent pour deux raisons. D'abord, un conflit issu d'une contrainte relationnelle peut être résolu par une modification de l'un ou l'autre agent, ou des deux, il faudra donc choisir quel(s) agent(s) doi(ven)t se modifier. Par ailleurs, lorsqu'une action d'un agent crée ou aggrave un conflit relationnel, il détériore non seulement son propre état, mais aussi celui de l'autre agent impliqué dans le conflit relationnel. Ainsi à cause des contraintes relationnelles et par « transitivité », une action d'un agent peut avoir des conséquences sur des objets situés assez loin de lui. C'est d'ailleurs cette contextualité qui rend complexe le processus de généralisation.

Le but de notre travail n'est pas de remplacer l'organisation pyramidale utilisée dans le projet AGENT, mais de proposer une autre organisation complémentaire pour les cas où la première n'est pas adaptée. A terme, les deux types d'organisations seront combinés pour généraliser de manière optimale des jeux de données complets selon leur caractéristiques géographiques.

Approche proposée : des agents qui voient et communiquent

Nos agents doivent voir et communiquer

Comme dans l'approche du projet AGENT, nos agents ont besoin de capacités d'introspection pour traiter leurs contraintes cartographiques internes. Toutefois, comme cela a déjà été traité dans le projet AGENT, nous nous concentrons à présent sur les capacités supplémentaires dont nos agents ont besoin pour traiter leurs contraintes relationnelles.

Une contrainte relationnelle d'un agent implique toujours l'agent lui-même et un autre agent situé dans son voisinage. C'est pourquoi, pour pouvoir identifier et évaluer ses contraintes relationnelles, un agent doit pouvoir percevoir son environnement spatial (ses voisins, l'espace libre...), et stocker une représentation de cet environnement. La manière dont un agent de notre système perçoit son environnement et en stocke une « image » fait l'objet du prochain paragraphe.

De plus, pour décider comment agir pour résoudre un conflit relationnel, un agent a besoin d'information sur lui-même (son état, ce qu'il peut faire ou non), mais aussi sur l'autre agent impliqué par le conflit. Dans certains cas, l'agent n'est pas capable de calculer toute l'information dont il a besoin par lui-même et il doit obtenir une partie de cette information de l'autre agent. C'est pourquoi nos agents ont besoin de pouvoir communiquer avec leurs voisins. La figure B.8.5 illustre cela. L'agent route qui est une impasse (jaune) peut détecter son conflit de superposition avec le bâtiment. L'agent bâtiment, lui, peut détecter son conflit de proximité avec la route rouge. Pour entreprendre la bonne action (se déplacer), l'impasse a besoin de savoir que le bâtiment est coincé. Sinon, elle attendra que le bâtiment se déplace, parce qu'*a priori*, il est plus coûteux de déplacer une route qu'un bâtiment. L'information peut être transmise du bâtiment à la route par un dialogue tel que celui de la figure : « Pousse-toi - Non, je ne peux pas ».



figure B.8.5

Pour prendre les bonnes décisions, nos agents ont besoin de communiquer.

Le système de dialogue entre agents doit permettre à un agent de commencer une action, interrompre cette action pour envoyer un message à un autre agent, interpréter un message reçu, et reprendre son action en fonction des messages reçus. Pour cela, nous utilisons des scénarios de conversations préétablis, qui indiquent comment agir et comment répondre quand on reçoit un message donné. Notre système de dialogue entre agents fait l'objet du dernier paragraphe de cette partie.

Comment nos agents perçoivent-ils leur environnement ?

Nos agents ont besoin de percevoir tous les agents avec lesquels ils partagent une contrainte relationnelle. Pour cela, nous décidons que chaque agent pourra percevoir la portion d'espace située dans une zone de distance d autour de lui, la distance d étant choisie suffisamment grande pour englober tous les agents avec lesquels une contrainte relationnelle peut hypothétiquement exister. La distance d est choisie en fonction des caractéristiques de la base de données et des spécifications de généralisation, en particulier de l'échelle finale. Cette zone perçue par l'agent est appelée « Zone Environnement » de l'agent (figure B.8.6) L'agent calcule sa « Zone Environnement » lors de la phase d'initialisation préalable au processus de généralisation.

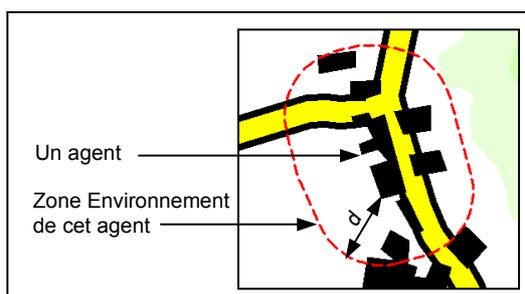


figure B.8.6

Zone Environnement d'un agent.

Une fois cette zone calculée, l'agent détecte ses « voisins » (les objets inclus totalement ou partiellement dans cette zone), puis identifie ses contraintes relationnelles avec chaque voisin. L'existence d'une contrainte relationnelle d'un agent vers un voisin est recherchée suivant la nature de l'agent, la nature du voisin et leur configuration spatiale. Par exemple, une contrainte relationnelle de « parallélisme entre route et bâtiment » sera recherchée pour un bâtiment seulement avec la route qui est la plus proche de lui (s'il y en a une dans sa Zone Environnement), et seulement si la distance les séparant est inférieure à un seuil donné. Ainsi, on peut prévoir la distance « de voisinage » d de manière à sur-détecter les voisins, puisque finalement seules les contraintes relationnelles pertinentes seront retenues.

Pour représenter les contraintes relationnelles, nous introduisons également le concept de *Zone contrainte*. L'idée est que certaines contraintes relationnelles d'un agent contraignent l'espace autour de lui: il y a certaines zones de l'espace dans lesquelles l'agent ne peut se trouver (totalement ou partiellement) sans violer certaines contraintes relationnelles. Nous appelons ces zones *Zones contraintes*. La figure B.8.7, ci-dessous, montre, pour un bâtiment, ses zones contraintes relatives à deux contraintes relationnelles avec l'impasse jaune. Si, au cours de sa généralisation, le bâtiment empiète sur la zone hachurée horizontalement, il viole sa contrainte de proximité avec l'impasse. S'il empiète sur la zone hachurée verticalement, il viole la contrainte de préservation de la position relative avec l'impasse (puisqu'il est supposé rester au bout de l'impasse). L'intérêt des zones contraintes est de remplacer une relation spatiale théorique telle que « être au bout de l'impasse » par une relation topologique, plus facile à mesurer, telle que « être partiellement inclus dans telle surface ». Le calcul des zones contraintes fait partie de l'initialisation d'un agent, il se fait en même temps que le calcul des contraintes relationnelles. L'agent met ensuite à jour ses zones contraintes à chaque fois qu'il est activé.

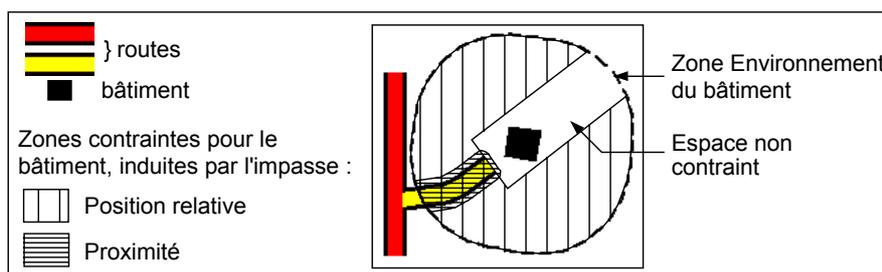


figure B.8.7 : zones contraintes

Le but des zones contraintes n'est pas d'interdire absolument à l'agent d'empiéter dessus. C'est plutôt un moyen de détecter rapidement, pour une position actuelle ou possible de l'agent, quelles sont les contraintes relationnelles que cette position respecte ou non. L'agent utilise donc ses zones contraintes lorsqu'il traite ses conflits relationnels :

- pour choisir une nouvelle position qui minimise les violations de contraintes relationnelles ;
- après un déplacement ou une transformation, pour savoir immédiatement quelles contraintes relationnelles ne sont pas satisfaites par sa nouvelle position (ou sa nouvelle forme), et pour envoyer un message aux agents partageant ces contraintes pour qu'ils essaient de résoudre le problème.

En effet, nous rappelons qu'en généralisation le respect strict des contraintes est souvent impossible, et que l'objectif est donc de trouver une solution optimale, qui minimise au mieux les violations de contraintes.

Comment nos agents communiquent-ils ?

Nous avons vu plus haut que nos agents ont besoin de communiquer en s'envoyant des messages, de manière à résoudre au mieux leurs contraintes relationnelles. Dans notre système les agents communiquent toujours deux à deux : les conversations sont toujours des dialogues, il n'y a pas de discussions à plus de deux agents. En revanche, un agent peut mener simultanément plusieurs conversations avec plusieurs interlocuteurs.

Pour rendre la communication entre agents possible au sein de notre système, nous devons définir la forme des messages échangés par les agents, et des protocoles d'enchaînement des messages au sein de conversations. Pour ce faire, nous nous sommes inspiré de travaux issus du domaine des systèmes multi-agents : [FERBER 95] et [BARBUCEANU, FOX 95].

Ces deux travaux reposent sur la théorie des actes de langage, comme la plupart des travaux sur les langages de communication entre agents. Une description rapide de la théorie des actes de langage, et de la manière dont elle peut être utilisée pour définir un langage de communication entre agents, est proposée dans [LABROU 01]. L'idée est qu'un énoncé, par exemple : « Je te demande de bouger », est constitué par un *argument* (ici le fait de bouger) et une *force illocutoire* portant sur cet argument (ici la demande d'action). La force illocutoire est marquée dans l'énoncé par un verbe appelé *performatif* (ici Demander). Il existe un nombre réduit de performatifs différents (demander de faire, demander si, affirmer, nier, refuser, accepter, etc). À partir de ces performatifs, on peut définir des protocoles de conversation (échange structuré de messages en vue d'atteindre un but donné). Une conversation est définie par l'enchaînement des performatifs, indépendamment de l'argument sur lequel porte la conversation. Par exemple, une demande d'action, quelle que soit l'action, peut être suivie d'un refus ou d'une acceptation. Une demande d'information peut être suivie d'une affirmation ou d'une notification d'incapacité à répondre.

On stocke ainsi dans le système des scénarios de conversation préétablis, qui indiquent l'enchaînement des performatifs échangés. Un agent qui reçoit un message se réfère alors à ces scénarios de conversation pour savoir quelles sont les réponses qu'il peut donner au message.

De plus, pour que l'agent puisse choisir la bonne réponse en fonction de la situation, on stocke pour chaque message d'une conversation :

- le nom de l'action que doit effectuer l'agent qui reçoit le message ;
- la règle qui permet de choisir le prochain message à envoyer en fonction du résultat de l'action.

Par exemple, un agent qui reçoit une demande d'action doit effectuer une analyse de sa capacité à réaliser l'action demandée. Si l'analyse conclut que l'agent est capable de faire l'action, l'agent renvoie un message d'acceptation et réalise effectivement l'action. Sinon, il renvoie un message de refus.

Résultats

Système implémenté

Le système décrit ci-dessus a été implémenté sur le Système d'Information Géographique LAMPS2 (de la société Laser-Scan), qui est orienté objet. Les données que nous généralisons sont des extraits de zones rurales de la BD Topo, base de données de résolution métrique de l'IGN. Le but est de produire des cartes topographiques à des échelles allant du 1 : 25 000 au 1 : 50 000. L'échelle finale est un paramètre du système.

Pour le moment, nous ne travaillons que sur des objets routes et bâtiments pour tester l'approche proposée. Tel qu'il est implémenté, le système a pour but de traiter les conflits de superposition et proximité entre les routes et les bâtiments, et entre les bâtiments entre eux. Actuellement les routes sont fixes, seuls les bâtiments sont mobiles.

Trois types de contraintes relationnelles sont considérés :

- contrainte de non-superposition des symboles: les symboles d'une route et d'un bâtiment, et les symboles de deux bâtiments, ne doivent pas se superposer ;
- contrainte de proximité: les symboles d'une route et d'un bâtiment, et les symboles de deux bâtiments, ne doivent pas être trop proches l'un de l'autre. Un seuil de proximité doit être respecté (paramètre du système ; 0,1mm carte dans notre cas) ;
- contrainte de topologie: un bâtiment ne peut pas « sauter par-dessus » une route.

De plus, on considère une contrainte interne de précision planimétrique pour les bâtiments, qui les empêche de trop s'éloigner de leur position initiale.

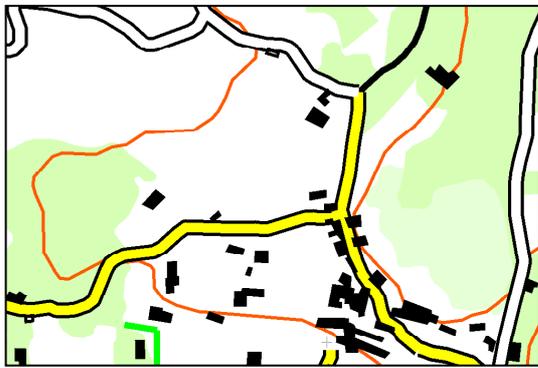
En l'état actuel, un seul scénario de dialogue est utilisé: le scénario de demande d'action brièvement décrit au paragraphe précédent (demande d'action pouvant être suivie d'une acceptation ou d'un refus).

Pour atteindre leurs buts (respecter leurs contraintes relationnelles), les routes ont pour comportement de « pousser » les bâtiments, en leur demandant de bouger pour résoudre le conflit. De la même manière, un bâtiment, pour résoudre ses conflits avec les autres bâtiments, les « pousse » en leur demandant de bouger. La priorité est donnée aux conflits de superposition entre routes et bâtiment. Autrement dit, un bâtiment acceptera de s'écarter d'une route même s'il doit pour cela empiéter sur un autre bâtiment (il résoudra ce nouveau conflit dans un deuxième temps en poussant l'autre bâtiment). En revanche, un bâtiment n'accepte jamais de résoudre un conflit avec une route (ou avec un autre bâtiment) si cela suppose de créer un conflit avec une autre route.

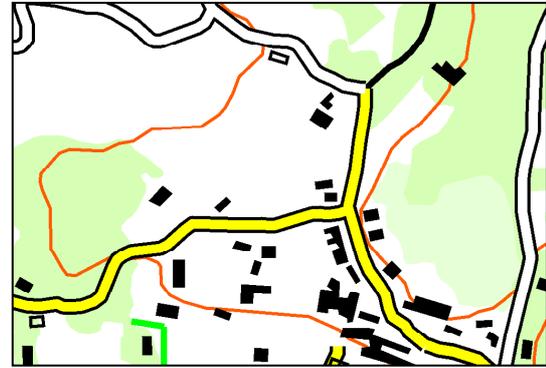
Enfin, nous avons ajouté aux agents bâtiments la méthode de généralisation interne issue du prototype du projet AGENT, de manière à ce qu'ils puissent aussi effectuer leur généralisation interne (résolution des conflits interne de taille, granularité, etc). Cela est possible parce que notre système est implémenté sur le même système d'information géographique que le prototype du Projet AGENT. Les bâtiments résolvent leurs conflits internes en s'appliquant des algorithmes de dilatation, simplification, équarrissage. La généralisation individuelle est ajoutée au comportement standard des agents bâtiments.

Résultats cartographiques

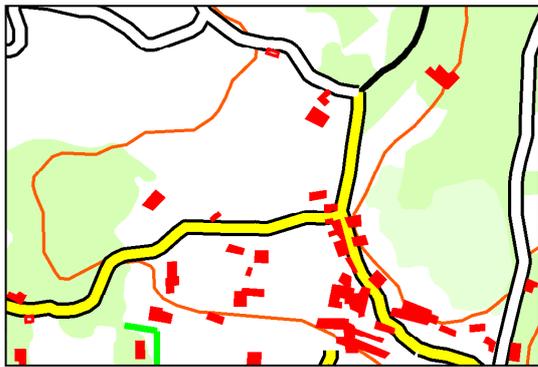
Les figures B.8.8 et B.8.9 (page suivante) montrent les résultats obtenus en généralisant des données extraites de la BD Topo, pour des échelles de 1 : 25 000 et 1 : 35 000. Nous rappelons que la BD Topo permet un affichage sans retouche pour une échelle de 1 : 15 000, du fait de la taille réelle des objets. Sur ces deux figures, les images (a) et (b) montrent l'état avant généralisation avec la symbolisation correspondant à l'échelle souhaitée. Sur l'image (b), les bâtiments sont dessinés en rouge pour faire apparaître clairement les conflits de superposition entre routes et bâtiments. L'image (c) montre les données généralisées, et l'image (d) permet la comparaison entre les situations avant et après généralisation.



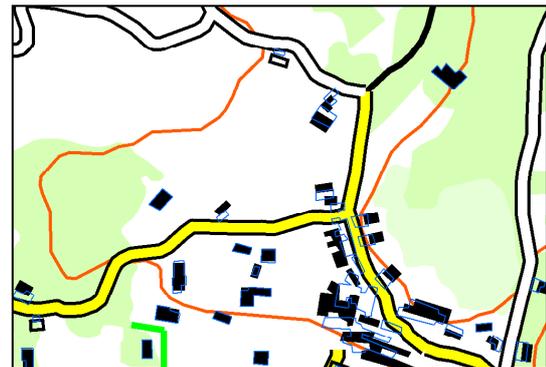
(a) Avant généralisation



(c) Après généralisation



(b) Avant généralisation - bâtiments en rouge



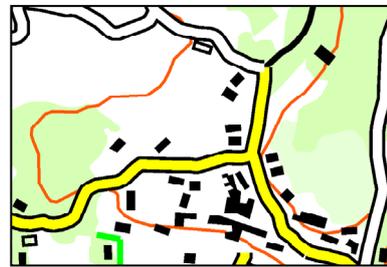
(d) Après (noir) et avant (fin trait bleu)

figure B.8.8 : résultats cartographiques à l'échelle du 1 : 25 000

À l'échelle du 1 : 25 000, tous les conflits de superposition sont résolus. Les bâtiments ont également effectué leur généralisation individuelle (la plupart se sont légèrement simplifiés ou équarris, certains se sont dilatés). Toutefois, on constate en deux endroits une petite dégradation de la position relative entre bâtiments, ce qui est normal puisque aucune contrainte n'a été définie pour empêcher ce type de dégradation.



(a) Avant généralisation



(c) Après généralisation



(b) Avant généralisation - bâtiments en rouge



(d) Après (noir) et avant (fin trait bleu)

figure B.8.9 : résultats cartographiques à l'échelle du 1 : 35 000

À l'échelle du 1 : 35 000, il y a évidemment moins d'espace disponible pour chaque agent (la carte est plus petite), aussi la situation est plus contrainte et le système doit trouver une autre solution. Cela montre son aspect adaptatif, cependant à cette échelle les limites du système dans son état actuel apparaissent clairement: tous les conflits de superposition ne sont pas résolus, et de plus certaines positions relatives sont fortement dégradées. Cela met en évidence le besoin d'introduire de nouvelles contraintes, telles qu'une contrainte de maintien des positions relatives, ainsi que le besoin de nouvelles opérations de généralisation, comme l'élimination et l'agrégation d'objets. Ces améliorations seront nécessaires pour le 1 : 50 000.

Conclusion et perspectives

Le but de notre travail est de mettre au point un système dédié à la généralisation automatique, reposant sur des interactions bilatérales entre « agents géographiques » qui sont les objets de la base de données géographique. Le système implémenté montre la faisabilité et la pertinence de l'approche: le système tourne et produit déjà des résultats cartographiques encourageants alors que seules quelques contraintes relationnelles ont été considérées. Dans des zones de faible densité, les résultats sont même d'ores et déjà corrects.

En termes d'innovations, la représentation de l'environnement au moyen de zones contraintes apporte une aide précieuse dans le choix d'une position satisfaisant au mieux l'ensemble des contraintes. De plus, il est très encourageant de constater que notre système et le système du Projet AGENT ne sont pas incompatibles, puisqu'on a pu intégrer à notre système la généralisation individuelle des bâtiments issue du prototype AGENT. Cela nous permet d'envisager un couplage plus important entre les systèmes.

Maintenant que nous disposons d'une première version qui fonctionne, le système doit être enrichi de manière à améliorer la qualité des résultats cartographiques. Pour cela, il faut tout d'abord prendre plus de contraintes relationnelles en compte: préservation des positions relatives, exagération des orientations relatives (parallélisme, perpendicularité), etc. Certaines de ces nouvelles contraintes, notamment celles qui concernent les orientations relatives, ne peuvent pas être représentées au moyen de zones contraintes. Aussi, nous travaillons actuellement sur une nouvelle représentation des contraintes, basée pour partie seulement sur le concept de zones contraintes.

Nous devons aussi introduire de nouvelles opérations de généralisation, déjà étudiées mais non encore introduites dans le système, telles que le déplacement des routes ou l'élimination de bâtiments. De plus, pour prouver l'intérêt de cette approche, nous devons également introduire d'autres thèmes géographiques que les routes et les bâtiments. Nous prévoyons d'introduire des objets des thèmes hydrographie et occupation du sol, qui sont les plus représentés sur une carte avec les routes et les bâtiments.

Enfin, l'approche de notre système, qui utilise seulement des interactions bilatérales, n'est pas adaptée à toutes les situations. En effet, elle repose sur une hypothèse forte qui n'est pas toujours vérifiée: qu'un réseau de conflits bilatéraux au sein d'un ensemble d'objets peut être résolu par des interactions bilatérales. Dans certaines situations sur-contraintes, cette approche n'est pas optimale et il faut utiliser une résolution par groupes. C'est pourquoi une prochaine étape de notre travail sera de combiner plus fortement notre système avec le système issu du Projet AGENT, de manière à utiliser quand c'est nécessaire l'organisation pyramidale décrite en première partie. Pour cela, nous devons d'abord savoir détecter les situations sur-contraintes. Nous envisageons de le faire par analyse des conversations entre agents.

Références

- [BARBUCEANU, FOX 95] M. Barbuceanu and M. Fox : *COOL : A Language for Describing Coordination in Multi-Agent Systems*, in Proc. of ICMAS'95, San Francisco (USA), 17-24, 1995.
- [BOBRICH 01] J. Bobrich : *Cartographic Map Generalization in Urban Districts*, in Proc. of 9th Annual Conference on GIS Research in United Kingdom, Glamorgan (UK), p.513-515, 2001.
- [FERBER 95] J. Ferber : *Les systèmes multi-agents*, InterEditions, 1995.
- [LABROU 01] Y. Labrou : *Standardizing Agent Communication. Multi-Agent Systems and Applications*, 9th ECCAI Advanced Course, 3rd European Agent Systems Summer School (EASSS'01), Prague, Selected Tutorial Papers, M. Luck, V. Marik, O. Stepankova, R. Trappl, Eds. LNAI n° 2086, p.75-97, 2001.
- [MÜLLER, WANG 92] J.-C. Müller and Z. Wang : *Area-patch generalisation: a competitive approach*, in The Cartographic Journal, vol. 29, n° 2, 1992, pp.137-144, 1992.
- [WEIBEL, DUTTON 99] R. Weibel and G. Dutton : *Generalising spatial data and dealing with multiple representations*, Geographical Information Systems - Principles, Techniques, Application and Management, 2nd Edition, P.A. Longley, M.F. Goodchild, D.J. Maguire and D.W. Rhind (eds), Vol.1, 125-155, 1999.

Publications

- [BARRAULT et al 01] M. Barrault, N. Regnauld, C. Duchêne, K. Haire, C. Baeijs, Y. Demazeau, P. Hardy, W. Mackaness, A. Ruas and R. Weibel : *Integrating Multi-agent, Object-oriented, And Algorithmic Techniques For Improved Automated Map Generalization*, in Proc. of the 20th International Cartographic Conference, vol. 3, Pékin (Chine), 2001, pp. 2110-2116, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-033-S-COM-MB, 2001.
- [DUCHÊNE, RUAS 01] 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, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-048-S-ART-CD, 2001.
- [BOFFET 02] A. Boffet : *Analyse multi-niveaux des espaces urbains*, in Revue internationale de Géomatique, vol. 12, n° 2, pp.215-223, laboratoire COGIT, IGN-SR-02-018-S-ART-AB, 2002.
- [MUSTIÈRE 98] S. Mustière : *Généralisation adaptative du linéaire basée sur la détection des empâtements, application au routier*, in Bulletin d'information de l'IGN, n°69, Bilan de la Recherche 1997, 1998, p. 33-42, IGN-SR-98-014-S-ART-SM, 1998.

[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, Université de Marne-la-Vallée, laboratoire COGIT, IGN-SR-96-017-S-CP, soutenue en octobre 1996.

[RUAS 01] A. Ruas : *Automatic generalisation project : Learning process from interactive generalisation*, OEEPE Official Publication n° 39, 2001, 98 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-003-S-ART-AB, 2001.

[RUAS 98] A. Ruas : *Method for building displacement in automated map generalisation*, in International Journal of Geographical Information Science, vol. 12, n° 8, 1998, pp. 789-803, IGN-SR-98-045-S-ART-AR, 1998.

[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), laboratoire COGIT, IGN-SR-99-009-S-ART-AB, 1999.

B.9 Fonctionnalité et vulnérabilité du réseau de métro parisien

Jean-François Gleyze

Les travaux présentés ici font partie intégrante de notre travail de thèse sur l'étude de la vulnérabilité des réseaux de transports [GLEYZE 00]. Ils sont issus d'une recherche de plusieurs mois effectuée en collaboration avec Marie Fouillet [FOUILLET 02], élève à l'IUP GMI de Paris-Dauphine et stagiaire au laboratoire COGIT, d'avril à septembre 2002. Dans les lignes qui suivent, nous allons présenter les fondements de ce stage, les principes théoriques utilisés, les résultats obtenus et les perspectives pour la fin de la thèse.

Introduction

Analyse de vulnérabilité dans les études de risques - Le cas des réseaux de transport

Notre travail s'inscrit dans l'action de recherche « Risques » du laboratoire COGIT, et s'intéresse à ce titre à l'impact des catastrophes sur le fonctionnement des réseaux de transport. De fait, les dommages engendrés par les catastrophes sur les réseaux ne se limitent pas à la dégradation structurelle des infrastructures, car celle-ci est susceptible de provoquer en chaîne des perturbations fonctionnelles sous la forme de coûts d'exploitation accrus en temps et en kilomètres.

Les dommages se répartissent ainsi en dommages directs (dommages structurels dus à l'action « physique » du phénomène) et en dommages indirects (dommages liés aux perturbations conséquentes), pour lesquels les coûts sont d'ordre de grandeur comparables. En pratique, l'évaluation des dommages indirects est rendue délicate par leur caractère anticipatif, exigeant par là de prévoir et de quantifier l'impact des dommages directs sur les infrastructures.

Dans cette logique, il s'agit d'évaluer la propension des réseaux à subir des dysfonctionnements consécutivement à l'impact physique de la catastrophe. Cette sensibilité du fonctionnement du réseau aux modifications structurelles des infrastructures correspond à la vulnérabilité du réseau. En ce sens, les différentes composantes du réseau (nœuds de connexions et tronçons) sont d'autant plus vulnérables que leur indisponibilité compromet le bon fonctionnement du réseau en provoquant une baisse d'efficacité dans la mise en relation des lieux sur le territoire. Ce schéma constitue le fondement à partir duquel nous allons aborder l'étude des réseaux de transport dans une logique de risques.

Contexte et objectifs du travail - Application au réseau de métro parisien

L'objectif est d'apprécier dans une logique de risques le fonctionnement d'un réseau par rapport à son rôle de médiateur sur le territoire. Il s'agit donc pour un réseau de transports donné :

- de définir son rôle sur le territoire et d'évaluer son efficacité ;
- de caractériser l'importance fonctionnelle de ses composantes en mode de fonctionnement normal ;
- d'élargir cette étude en prenant en compte l'éventualité de dommages structurels sur les infrastructures afin de mettre en évidence les composantes susceptibles d'offrir des chemins alternatifs aux usagers.

Dans la pratique, nous avons choisi de réaliser notre étude sur le réseau de métro parisien, car celui-ci présente plusieurs avantages :

- les temps de parcours sur le réseau sont relativement constants et les usagers raisonnent en information quasi-parfaite (c'est-à-dire qu'ils empruntent généralement les chemins les plus rapides) ;
- l'étude d'un réseau ferré ne pose pas les problèmes de congestion rencontrés sur les réseaux routiers ;
- la taille du réseau de métro parisien offre un bon compromis - en l'occurrence, ce réseau est assez grand pour amorcer une étude approfondie, mais pas trop complexe pour pouvoir effectuer tous les calculs souhaités.

Démarche

La première étape de notre travail consistera à proposer une modélisation du réseau de métro adaptée à notre cadre d'étude. Il s'agira en particulier d'effectuer des choix quant à la représentation des stations à correspondance, à la valuation des tronçons ferrés et des couloirs de correspondance et aux relations origine-destination envisagées sur le territoire.

Sur cette base, nous analyserons dans un deuxième temps l'efficacité et la fonctionnalité du réseau de métro en décrivant son fonctionnement par des indices d'accessibilité et de centralité. Cette analyse doit notamment permettre de mettre en évidence les stations principales et les axes majeurs de déplacement du réseau. Nous nous placerons enfin dans un contexte de risques en intégrant la possibilité d'événements dommageables pour le réseau.

À l'aide d'un indice synthétique, d'une part, et par l'observation de scénarios d'endommagement, d'autre part, nous repèrerons les composantes du réseau offrant des alternatives aux plus courts chemins. La combinaison des résultats concernant les axes principaux et les axes alternatifs du réseau nous permettra d'appréhender la vulnérabilité fonctionnelle du métro parisien et d'ouvrir des perspectives pour notre champ de recherche.

Modélisation

Analyser le fonctionnement du métro suppose de fournir une représentation du réseau sur laquelle nous allons pouvoir définir, construire, calculer et interpréter des indicateurs mathématiques [GLEYZE 01a]. En pratique, les réseaux de transport sont formalisés par des graphes dont les sommets et les arcs correspondent respectivement aux carrefours (ou nœuds de connexion) et voies (ou tronçons). Cette représentation fait cependant abstraction du territoire sur lequel les individus évoluent : il importe donc de modéliser parallèlement les relations spatiales formulées par les individus et leur traduction en termes de demandes en déplacement sur le réseau. Nous allons aborder chacun de ces deux points ci-après.

La représentation du réseau de métro par un graphe

L'étude concerne le réseau de métro parisien inscrit dans les limites de la ville de Paris, et matérialisé par seize lignes (quatorze lignes principales et deux lignes « bis ») et deux cents quarante deux stations, ainsi que le présente la figure B.9.1, page suivante.

Les plans usuellement fournis par la RATP (Régie Autonome des Transports Parisiens, chargée, entre autres, de l'exploitation du réseau de métro parisien), recensent le réseau ferré de Paris et de sa proche banlieue, mais nous ne prendrons pas en compte les réseaux RER et SNCF dans notre étude : bien que l'emprise de ceux-ci couvre la ville de Paris et ses environs, ils ont un rayon d'action plus important et agissent de fait à une échelle régionale, ce qui dépasse largement la portée du réseau de métro.

Le réseau est modélisé par un graphe, dans lequel les sommets et les arcs correspondent respectivement aux stations et aux tronçons entre ces stations. L'existence de tronçons à sens unique sur les lignes 7bis et 10 oblige théoriquement d'orienter tous les arcs du graphe et de faire apparaître deux arcs distincts pour tout tronçon fonctionnant à double-sens. Dans le cadre précis du réseau de métro parisien, nous avons constaté que les résultats étaient faiblement influencés par l'existence de ces tronçons à sens unique, aussi, nous avons pris le parti de représenter tous les tronçons ferrés par des arcs non orientés pouvant être parcourus indifféremment dans un sens ou dans l'autre. Ce choix offre l'avantage d'alléger considérablement la base de données et donc les temps de calculs.

Le point délicat de la modélisation du réseau repose essentiellement sur le choix de représentation des stations à correspondance. En pratique, la pénalité en temps induite par les correspondances exige d'adopter une représentation du graphe tenant compte des délais mis par les voyageurs pour se rendre d'un quai à un autre au sein d'une même station de métro.

Ceci nous conduit à adopter une représentation éclatée des stations à correspondance, selon le principe des zooms nodaux [CHAPELON 96]. Il s'agit de subdiviser chaque station à correspondance en autant de sous-stations qu'il y a de lignes traversant la station considérée - chacune des sous-stations étant intégrée dans le parcours de la ligne qui lui est associée. Les correspondances entre les différentes lignes sont matérialisées par des arcs reliant les sous-stations entre elles.

Ces sous-stations sont enfin organisées autour d'une station de niveau supérieur - une « méta-station » - prévue pour l'entrée et la sortie des voyageurs. Les sous-stations sont reliées à la méta-station par des arcs d'accès de longueurs identiques : de cette manière, le calcul du plus court chemin depuis une méta-station affecte naturellement et sans calcul supplémentaire le voyageur à la sous-station offrant la meilleure option pour rejoindre sa destination (Cette structure nous permettra par ailleurs d'exploiter les données de fréquentation sur les arcs d'accès afin de connaître *a posteriori* la répartition des entrants de la méta-station parmi ses sous-stations).

La modélisation complète des stations à correspondance donne pour la station Bastille la structure présentée en figure B.9.2, page 100.

Dans la suite de cet article, le terme générique de « stations » désigne les points d'entrée ou de sortie du réseau, à savoir :

- les stations isolées, c'est-à-dire les stations traversées par une seule ligne ;
- les stations à correspondance, modélisées par des méta-stations.

En ce sens, le terme de « stations » s'oppose à celui de « sous-stations », désignant les quais des « méta-stations » et ne pouvant en aucun cas constituer l'origine ou la destination d'un trajet.

En adoptant cette structure de graphe, le réseau de métro de Paris intra-muros est composé de :

- deux cent quarante deux stations, soit cent quatre vingt quatre stations isolées et cinquante-huit stations à correspondance (Plus exactement, il y a cinquante-six stations à correspondance et deux stations de configuration simplifiée. Il s'agit des stations Bonne Nouvelle et Grands Boulevards, offrant des accès aux lignes 8 et 9, mais ne permettant pas aux voyageurs d'effectuer une correspondance entre ces deux lignes (si l'on s'en tient aux informations fournies par les plans de la RATP). De fait, ces deux stations sont modélisées par des méta-stations, avec des arcs d'accès aux lignes 8 et 9, mais sans arcs de correspondance entre ces deux lignes ;
- cent trente huit sous-stations et autant d'arcs d'accès, associés aux cinquante-huit stations à correspondance ;
- trois cent sept tronçons ferrés ;
- cent huit arcs de correspondance entre sous-stations.

Pour être complète, la description de ce graphe doit intégrer les temps de parcours associés à chacun des arcs.



carte B.9.1 : le réseau de métro parisien intra-muros (d'après www.ratp.fr)

Pour les tronçons ferrés, nous avons repris les temps de parcours estimés par Pierre Coroller à l'occasion d'une étude sur les stations du métro parisien [COROLLER 02]. Ces temps sont déduits des horaires de passage des premiers et des derniers trains fournis par la RATP et des distances à vol d'oiseau séparant les paires de stations successives. Les calculs prennent, par ailleurs, en compte les temps d'arrêt en station ainsi que les temps d'accélération et de décélération de la rame.

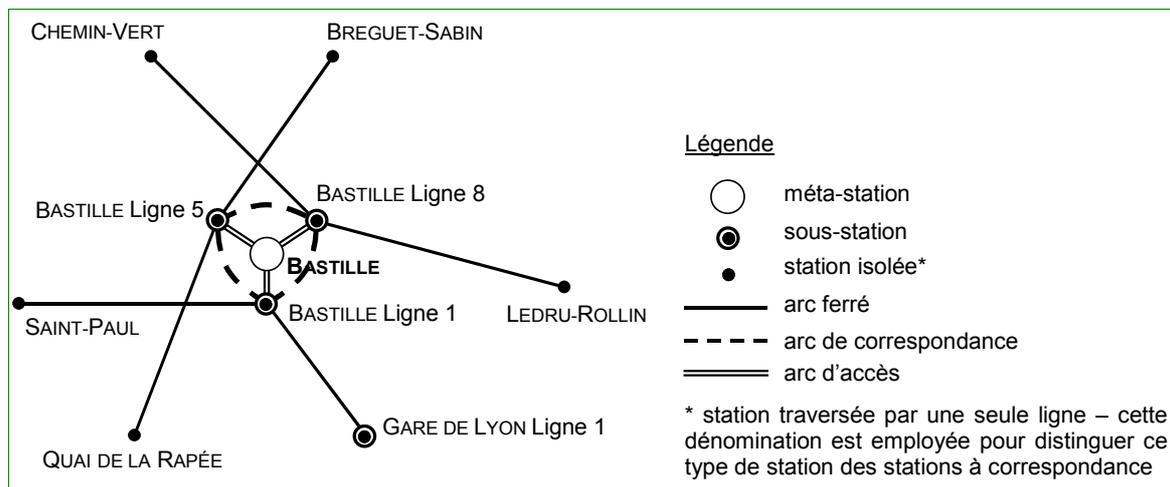


figure B.9.2 : modélisation des stations à correspondance. Exemple de la station Bastille

Pour les arcs de correspondance, une valeur arbitraire de trois minutes a été attribuée à une grande majorité des arcs. Seules quelques correspondances recensées dans [ANTISÉCHE 01] possèdent des valeurs singulières en raison de la longueur des couloirs à parcourir : à titre d'exemple, la correspondance entre les lignes 3 et 12 à la station Saint-Lazare est évaluée à 4 mn 30.

Enfin, la plupart des arcs d'accès se voient attribuer une valeur arbitraire de deux minutes : ce choix ne résulte pas tant de la volonté de représenter la longueur des couloirs d'accès des méta-stations que d'empêcher les voyageurs d'emprunter ces mêmes couloirs en guise de correspondance. Cette exigence oblige d'ajuster les valuations des arcs d'accès pour les méta-stations dont les temps de correspondance sont particulièrement longs, et oblige par exemple de valuer les arcs d'accès de la station Saint-Lazare à trois minutes.

Les déplacements des usagers sur le territoire et les relations origine-destination associées sur le réseau

La représentation du réseau de métro par un graphe doit s'accompagner de choix cohérents quant à l'intégration du réseau sur le territoire. Le trait d'union entre ces deux entités est réalisé par les usagers. Le réseau est en effet mis à la disposition de la population pour se rendre aisément d'un point à un autre du territoire.

Il s'agit donc en premier lieu de rendre compte de la demande en déplacement formulée par les usagers au réseau. Cette demande est formalisée par la matrice origine-destination des déplacements, dans laquelle le coefficient (i,j) correspond au nombre d'usagers souhaitant aller de la station i à la station j . Dans les études de transport, des enquêtes sont réalisées afin d'estimer la répartition de la demande et donc les coefficients de la matrice origine-destination.

Dans cette logique, la demande dépend de la répartition de la population et de la localisation des lieux d'attraction sur le territoire (emplois, commerces, loisirs). Cependant, cette demande est contextuelle et exige de disposer de données auxquelles nous n'avons pu avoir accès. Nous avons donc pris le parti de construire une demande uniforme sur le territoire, représentative des déplacements d'usagers dont l'origine et la destination de leur déplacement seraient aléatoires sur le territoire.

Pour une origine O et une destination D données, on considère alors que le trajet en métro associé s'effectue entre les stations i et j du réseau les plus proches des extrémités O et D . (Nous sommes conscients qu'il est parfois plus avantageux pour l'usager d'accéder au réseau par une station plus éloignée, en particulier lorsqu'il s'agit de s'épargner les frais d'une correspondance. Ce point nécessite cependant une modélisation complexe du comportement des usagers, raison pour laquelle nous avons préféré nous en tenir à l'hypothèse présentée ici).

Ce choix de pondération spatiale présente le mérite de compenser l'hétérogénéité spatiale des stations sur le territoire. À défaut de disposer d'une matrice origine-destination représentative de la réalité socio-économique du territoire, la demande ainsi simulée permet d'appréhender le réseau dans une logique de desserte uniforme du territoire (là encore, l'hypothèse de modélisation est simple puisqu'elle considère implicitement que le poids affecté à une relation entre deux stations i et j est indépendant de la position relative de ces deux stations sur le territoire. Ce choix répond au souci de ne privilégier aucune partie du territoire en tant que source ou puits potentiel d'un déplacement, et donc de n'introduire aucune déformation spatiale dans la manière d'appréhender le territoire).

Étant donnée la matrice origine-destination des déplacements, nous sommes maintenant en mesure d'observer le fonctionnement des échanges entre réseau et territoire, et les flux de voyageurs au sein du réseau lui-même.

En particulier, la structure du réseau et les distinctions effectuées entre les différents types de sommets et d'arcs permet de distinguer plusieurs « types » de voyageurs au sein des stations et du réseau.

Les charges des différents arcs environnant une station à correspondance permettent ainsi de définir les catégories de voyageurs suivantes :

- les entrants-sortants : charge totale des arcs allant de la méta-station aux sous-stations (arcs d'accès) ;
- les correspondants : charge totale des arcs reliant les sous-stations deux à deux (arcs de correspondance) ;
- les piétons : total des entrants-sortants et correspondants ;
- les voyageurs assis : charge totale des arcs ferrés émanant et aboutissant aux sous-stations, à laquelle on a retranché la charge correspondante aux piétons (il s'agit précisément des voyageurs « fixes », assis avant, pendant et après l'arrêt du train en station) ;
- les voyageurs en transit : total des correspondants et des voyageurs assis.

La figure B.9.3 schématise ces différentes catégories de voyageurs. Dans ces représentations, les voyageurs concernés apparaissent dans les arcs indiqués en trait foncé.

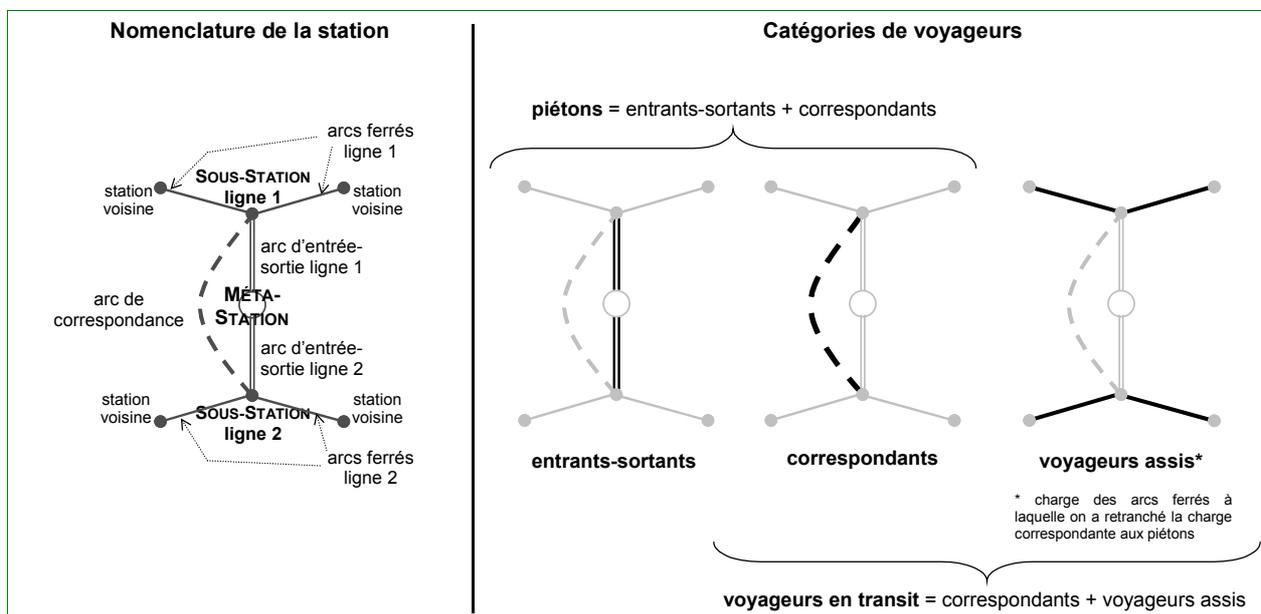


figure B.9.3

Nomenclature d'une station à correspondance à deux lignes et distinction au sein d'une telle station des entrants-sortants, correspondants, voyageurs assis, piétons et voyageurs en transit.

Naturellement, pour les stations isolées, les distinctions se réduisent à faire la part :

- des entrants et des sortants, dont les proportions sont déduites des coefficients de la matrice origine-destination ;
- et des voyageurs assis, constituant à eux seuls les voyageurs en transit.

Pour la représentation du réseau et les catégories de voyageurs ainsi considérées, nous sommes maintenant en mesure d'aborder l'étude du fonctionnement du réseau de métro au travers de plusieurs indicateurs.

Le fonctionnement du réseau de métro en mode normal

Le rôle fondamental d'un réseau de transports est d'assurer les relations entre les lieux d'un territoire, compte-tenu des demandes en déplacement formulées par les utilisateurs. Analyser le fonctionnement d'un réseau consiste ainsi, d'une part, à déterminer dans quelle mesure le réseau remplit son rôle, d'autre part, à dégager les mécanismes structurels sous-jacents.

En premier lieu, la manière la plus naturelle d'évaluer l'efficacité d'un réseau de transports est de mesurer l'accessibilité des différents lieux desservis. Cette notion rend compte de la facilité pour les usagers à atteindre leurs destinations compte-tenu des possibilités offertes par le réseau.

En amont de cette évaluation, l'étude de la structure du réseau doit mettre en relief le rôle fonctionnel joué par chacune de ses composantes (sommets et arcs) dans la mise en relation des lieux du territoire. À cet effet, la notion de centralité intermédiaire permet de rendre compte du degré de sollicitation de ces composantes et de mettre ainsi en évidence les stations et axes principaux structurant les déplacements.

Analyse de l'efficacité du réseau - Les indices d'accessibilité

L'accessibilité est une mesure de la séparation spatiale des lieux sur un territoire desservi par un réseau de transports donné : en ce sens, elle renseigne sur l'efficacité de ce réseau comme médiateur spatial. En particulier, l'indice d'éloignement moyen pour un lieu donné considère la moyenne pondérée des distances (ici des temps de parcours) entre ce lieu et tous les autres lieux du territoire [PUMAIN, SAINT-JULIEN 97].

En ce sens, cet indice place l'usager dans la perspective où celui-ci aurait à rejoindre successivement tous les lieux du territoire : il s'agit ici d'une logique d'optimisation des temps de déplacements sur l'ensemble du territoire. Les valeurs obtenues sur le réseau de métro sont représentées sur la figure B.9.4.

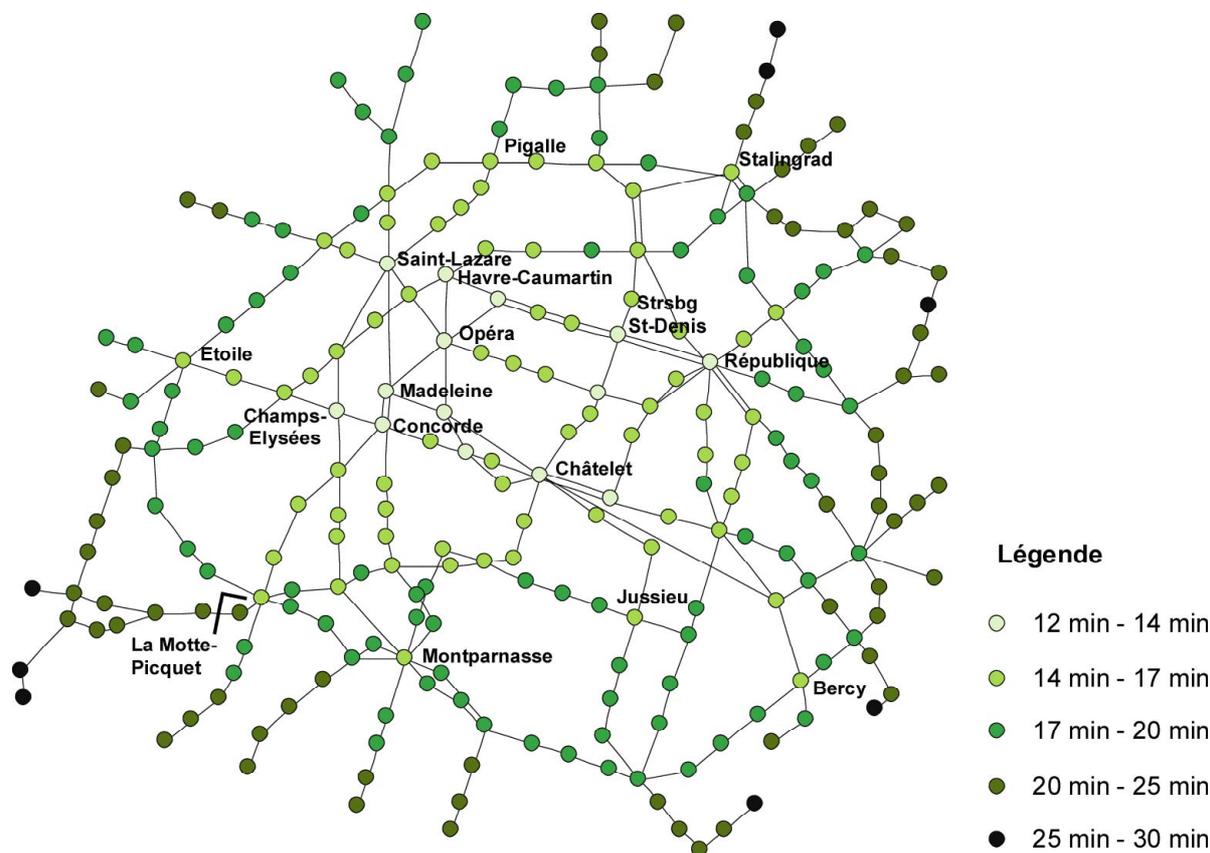


figure B.9.4 : indice d'éloignement moyen sur le réseau de métro parisien

Numériquement, l'indice d'éloignement moyen quantifie l'efficacité du réseau par des temps moyens de déplacement. Ceux-ci peuvent être exprimés localement au niveau de chacun des points d'accès du réseau (c'est-à-dire des stations), ou globalement en effectuant une moyenne pondérée des valeurs relevées sur tout le territoire, ainsi que le présente le tableau B.9.1, page suivante.

En pratique, les valeurs d'éloignement moyen obtenues sur le métro permettent d'avoir une bonne idée de l'organisation du centre et de la périphérie du territoire parisien desservi par le métro. Il apparaît ainsi que le réseau de métro fournit les meilleurs accès à un large centre ouest de la ville, situé entre les stations Châtelet et Saint-Lazare.

D'une part, ce décalage induit un déséquilibre est-ouest, manifesté par une mauvaise accessibilité des quartiers du centre est de la ville (à l'est de la ligne 5 Place d'Italie - Stalingrad). D'autre part, la richesse des correspondances offertes par ce centre facilite les accès sur la rive droite de la ville.

À l'inverse, le réseau offre moins de possibilités sur la rive gauche et rend d'autant plus important le rôle joué par les trois grosses stations à correspondance Montparnasse, La Motte-Picquet et Place d'Italie.

Ces stations, ainsi que leurs « homologues » sur la rive droite (Stalingrad, Barbès, Pigalle, Place de Clichy), constituent les points d'échange entre le centre et la périphérie du réseau, matérialisées par les lignes circulaires 2 et 6. Ces dernières marquent en effet la frontière au-delà de laquelle l'accessibilité des stations est rendue difficile du fait de leur position sur les extrémités des lignes.

Partant de ces constats généraux sur l'efficacité du réseau de métro dans la desserte du territoire parisien, nous allons maintenant analyser la fonctionnalité de ses composantes en configuration normale.

tableau B.9.1 : éloignement moyen pour des stations remarquables du réseau de métro

Eloignement moyen					
Rang		Valeur	Rang		Valeur
1	Châtelet	12'04	29	Bastille	14'49
2	Concorde	12'36	31	Place de Clichy	15'00
3	Madeleine	12'39	33	Odéon	15'03
4	Opéra	12'47	50	Charles de Gaulle-Étoile	15'40
5	Saint-Lazare	12'58	51	Gare de Lyon	15'41
6	Strasbourg - Saint-Denis	13'16	59	La Motte-Picquet - Grenelle	16'09
7	Palais-Royal - Musée du Louvre	13'27	61	Duroc	16'11
8	République	13'27	69	Bercy	16'33
9	Champs-Élysées - Clémenceau	13'38	70	Jussieu	16'34
10	Réaumur-Sébastopol	13'40	77	Stalingrad	16'50
20	Invalides	14'18	84	Place d'Italie	17'02
24	Franklin-D. Roosevelt	14'42	88	Gare d'Austerlitz	17'16
26	Gare de l'Est	14'46	105	Nation	17'52
28	Montparnasse-Bienvenue	14'47	120	Reuilly-Diderot	18'25
Moyenne pondérée sur le territoire					18'23

Analyse de la fonctionnalité du réseau - L'indice de centralité intermédiaire

L'indice de centralité intermédiaire pour une composante donnée (sommets ou arcs) correspond à la fréquence avec laquelle cette composante se trouve sur les plus courts chemins liant les paires de sommets sur le graphe [FREEMAN 78]. En ce sens, la centralité intermédiaire est une mesure du contrôle des relations au niveau de chacune des composantes du réseau et renseigne de fait sur l'importance fonctionnelle des sommets et des arcs du réseau pour le rôle assigné à ce dernier.

L'étude de la centralité intermédiaire sur le réseau de métro revient à observer les flux de voyageurs qui transitent par les différentes composantes du réseau. Ceux-ci correspondent aux voyageurs assis, auxquels on ajoute les voyageurs en correspondance pour les stations à correspondance. Les valeurs obtenues pour cet indice sont représentées sur la figure B.9.5, page suivante.

De prime abord, les résultats sur l'indice de centralité intermédiaire font apparaître que le centre fonctionnel du réseau correspond au centre de la ville en termes d'accessibilité. Décalé vers l'ouest par rapport au centre géographique de la ville, le centre fonctionnel regroupe cinq des dix stations les plus fréquentées du réseau (Concorde : 19,08%, Saint-Lazare : 18,68%, Opéra : 13,92%, Madeleine : 13,48% et Invalides : 13,47%).

Par ailleurs, les grosses stations à correspondance ont des indices élevés quelles que soient leur localisation sur le territoire (ainsi en est-il de République : 19,57%, Montparnasse : 16,56%, Strasbourg-Saint-Denis : 13,86%, La Motte-Picquet : 13,36% et, dans une moindre mesure Gare de l'Est, Stalingrad, Bastille et Place d'Italie, aux alentours de 10%).

Contre toute attente, Nation et Étoile drainent seulement 5 à 6% des voyageurs malgré le nombre élevé de lignes qui traversent ces deux stations (quatre à Nation et trois à Étoile) : ces faibles résultats s'expliquent par la position très excentrée de ces stations et la présence des terminus des lignes circulaires 2 et 6 qui limitent les choix des voyageurs.

En termes d'arcs, les trafics s'organisent nettement autour de six axes majeurs :

- deux axes rapides nord-sud dans la partie ouest de la ville : la ligne 8 entre La Motte-Picquet et Opéra et la ligne 13 entre Montparnasse et Place de Clichy ;
- deux axes radiaux est-ouest et nord sud : la ligne 1 entre entre Franklin D. Roosevelt et Châtelet et la ligne 4 entre Gare de l'Est et Odéon ;
- deux axes circulaires au nord et au sud de la ville : la ligne 2 entre Place de Clichy et Stalingrad et la ligne 6 entre La Motte-Picquet et Place d'Italie.

En particulier, l'importance des lignes 8 et 13 confirme le positionnement du centre fonctionnel du réseau autour du quartier centre-ouest Saint-Lazare - Invalides. Par ailleurs, la valorisation des lignes 1, 4, 2 et 6 met en relief l'efficacité d'une organisation circumradiale des déplacements en métro dans Paris. Ces considérations envisagent le métro dans son mode de fonctionnement normal. Cependant, la logique de risques dans laquelle nous travaillons n'exclut pas l'éventualité de catastrophes. L'indisponibilité résultante de certaines parties du réseau remet en question le fonctionnement courant du réseau, et il s'agit alors d'étendre la notion de fonctionnalité à la notion de vulnérabilité en prenant en compte la richesse des solutions alternatives offertes pour le réseau.

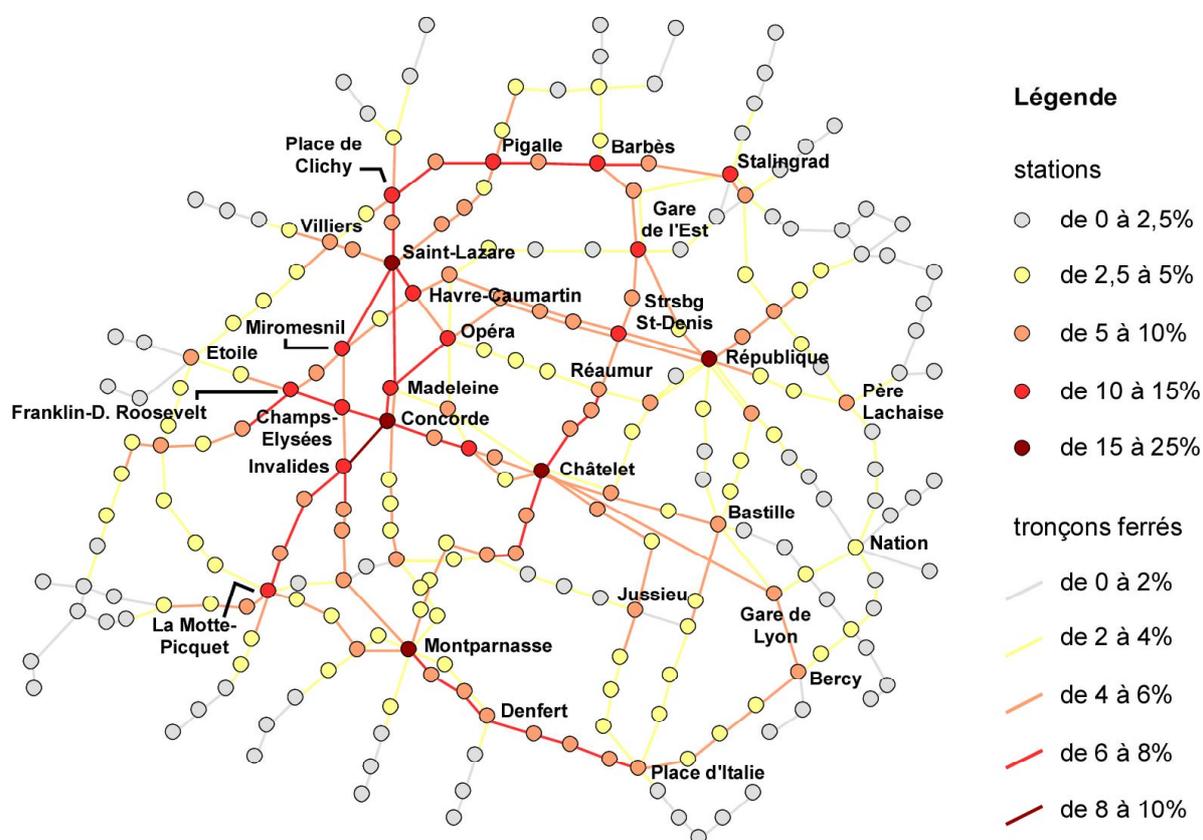


figure B.9.5 : indice de centralité intermédiaire (en proportion de voyageurs en transit) sur le réseau de métro parisien

Le fonctionnement du réseau de métro en mode endommagé

Dans un contexte de risques, il ne s'agit plus seulement de juger du rôle fonctionnel des nœuds et des tronçons en mode de fonctionnement normal, mais également d'apprécier les possibilités offertes par le réseau en termes de déviations lorsque des incidents surviennent. La vulnérabilité du réseau est alors appréciée en regard des potentialités qu'il offre en termes de chemins alternatifs : notre objectif est de dégager la structure de ces chemins alternatifs et de la confronter avec les résultats de fonctionnalité obtenus précédemment afin de suggérer des stratégies pour protéger le réseau. À cet effet, nous aborderons deux démarches : l'une, prospective évalue un indicateur synthétique représentatif des potentialités du réseau en termes de déviations, l'autre, contextuelle considère plusieurs scénarios d'endommagement judicieusement choisis.

Analyse des chemins alternatifs par un indice synthétique

Ainsi que nous l'avons vu plus haut, l'indice de centralité intermédiaire effectue une moyenne pondérée des flux selon les plus courts chemins pour toutes les relations origine-destination envisagées. La logique de déplacement des plus courts chemins répartit les flux dans l'hypothèse où le réseau fonctionne correctement (trafics fluides sur un réseau non endommagé) et où les usagers ont une connaissance parfaite du réseau.

Cependant, ce choix de fonctionnement n'envisage pas l'éventualité de dysfonctionnements, au cours desquels certains nœuds ou tronçons deviennent momentanément indisponibles ou moins performants, et obligent alors les usagers à emprunter des déviations. Pour intégrer cet aspect du réseau dans l'évaluation de l'importance fonctionnelle de ses composantes, nous sommes amenés à considérer un comportement des usagers prenant en compte non seulement les plus courts chemins, mais également les chemins alternatifs offerts par le réseau [GLEYZE 01b].

Les recherches dans le domaine des transports proposent des modélisations probabilistes de ce comportement. Selon le modèle Probit, les usagers ont une connaissance imparfaite du réseau qui se traduit par des valuations probabilistes des différents arcs du réseau dépendantes d'un facteur d'incertitude β (pour plus de détails : voir [SHEFFI 85]). Les usagers peuvent ainsi emprunter des chemins alternatifs avec d'autant plus de chances que ceux-ci occasionnent un faible détournement par rapport au(x) plus court(s) chemin(s). En pratique, la répartition des flux résultant du modèle Probit est évaluée à partir de simulations de Monte-Carlo.

Dans l'exemple de la relation Trocadéro - Nation sur le réseau de métro, les calculs de centralité intermédiaire réalisés précédemment conduisaient à affecter la totalité des usagers sur le plus court chemin matérialisé sur la ligne 9 sans correspondance (cf figure B.9.6a). En revanche, dans le contexte du modèle Probit, l'existence de plusieurs chemins entre Trocadéro et Nation conduit, au gré des simulations de Monte-Carlo, à affecter les usagers sur l'un ou l'autre des chemins possibles, avec d'autant plus de chances que ceux-ci sont courts. L'affectation résultante du trafic entre l'origine et la destination considérées est alors obtenue en cumulant les flux individuels simulés (cf la figure B.9.6b) et met ainsi en valeur la variété et l'importance des chemins alternatifs offerts par le réseau.

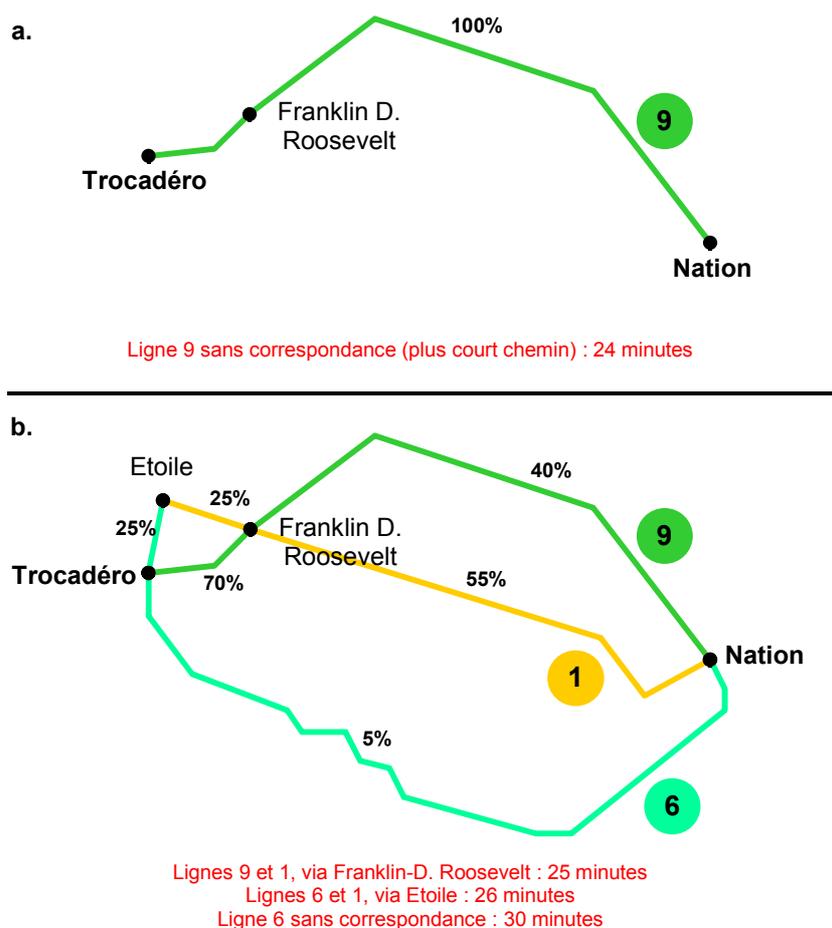


figure B.9.6

Affectation des usagers selon les plus courts chemins (partie supérieure) et selon le modèle Probit ($\beta = 0,5$; 100 simulations de Monte-Carlo - partie inférieure) pour la relation Trocadéro - Nation.

Pour la relation considérée dans le cadre du modèle Probit avec le paramétrage $\beta = 0,5$, seuls 40% des usagers empruntent réellement le plus court chemin. De fait, en considérant les flux résultant du modèle Probit dans le calcul de l'indice de centralité intermédiaire, on définit un nouvel indice de centralité - l'indice Probit - représentatif non seulement de la fonctionnalité naturelle des arcs et des sommets du réseau, mais également de la capacité de chacun d'eux à proposer des solutions alternatives aux plus courts chemins dans l'éventualité de dysfonctionnements.

En pratique, nous avons calculé l'indice Probit ($\beta = 0,5$) sur les différentes composantes du réseau. Nous avons ensuite calculé la différence entre cet indice et l'indice de centralité intermédiaire introduit précédemment : les résultats de cette opération sont représentés sur la figure B.9.7, page suivante. L'intérêt de représenter la différence entre l'indice Probit et l'indice de centralité intermédiaire permet au travers des scores positifs de mettre en valeur les composantes du réseau qui sont susceptibles d'intervenir significativement au sein de chemins alternatifs.

Sur la figure B.9.7, on relève ainsi l'importance de l'axe est-ouest Nation - Gare de Lyon (ligne 1) - Madeleine (ligne 14) - Saint-Lazare (ligne 12). Celui-ci vient probablement au secours des circulaires 2 et 6 ainsi que de la ligne 9, pour lesquelles on mesure des scores négatifs.

Autour du centre fonctionnel du réseau, les lignes 8 et 13 identifiées précédemment comme des axes principaux de déplacement sont à nouveau mises en valeur ici. En l'occurrence, ces lignes sont fortement imbriquées dans le centre fonctionnel du réseau et empruntent localement des parcours assez proches : elles sont en effet connectées entre elles au niveau de la station Invalides et assurent des correspondances avec six autres lignes au niveau d'un regroupement de huit stations.

En pratique, les lignes 8 et 13 sont susceptibles de s'épauler mutuellement ou de pallier d'éventuelles lignes en correspondance qui viendraient à défaillir. À l'est de la ville, la ligne 5 se distingue particulièrement de Stalingrad à Place d'Italie, probablement en tant qu'axe alternatif nord-sud à la ligne 4 (Gare du Nord - Montparnasse).

Notons enfin l'importance locale de certains tronçons radiaux, qui présentent le point commun de pénétrer la ville au niveau des circulaires et de délester celles-ci par des chemins alternatifs empruntant des trajets plus centraux.

Il s'agit notamment de la ligne 5 à l'est en tant qu'axe traversant nord-sud, mais également de la ligne 10 au sud-ouest entre Michel-Ange et Odéon (délestage de la circulaire sud et de la ligne 9 dans le XVI^{ème}) et de la ligne 11 au nord-est entre Belleville et Châtelet (délestage de la circulaire nord). De manière moins marquée, les circulaires sont délestées au sud par les lignes 12, 14 et 8, et au nord par les lignes 7 et 3.

Cette étude complète ainsi l'analyse fonctionnelle réalisée au préalable. Elle nous a permis notamment d'identifier des axes secondaires de déplacement, selon les directions est-ouest (Nation - Saint-Lazare *via* la ligne 14), nord-sud (ligne 5) et selon des directions radiales en périphérie (lignes 10 et 11, entre autres).

Disposant ainsi d'un panorama sur le rôle fonctionnel des différentes lignes de métro dans une logique combinée de plus courts chemins et de chemins alternatifs, nous allons envisager plusieurs scénarios d'endommagement et confronter l'apport des approches synthétique (indice Probit) et contextuelle (étude de scénarios) dans l'analyse de vulnérabilité du réseau de métro.

Analyse des chemins alternatifs par des scénarios d'endommagement

L'analyse de vulnérabilité consiste à identifier les sommets et les arcs du réseau à protéger afin d'éviter d'importants dysfonctionnements en cas de rupture. À cet effet, [HOLME et al 02] propose une démarche prospective consistant à élaborer les scénarios d'endommagement les plus préjudiciables pour le fonctionnement du réseau. Ces scénarios découlent de stratégies d'attaque, dont l'objet est de sélectionner les sommets et les arcs à supprimer successivement afin d'optimiser l'effet destructeur sur le bon fonctionnement du réseau.

L'effet destructeur sur le réseau est lui-même apprécié au travers de la baisse d'efficacité, traduite par la dégradation des valeurs de l'indice d'éloignement moyen sur les stations (niveau local) et sur le réseau dans sa totalité (niveau global). À défaut de pouvoir matériellement envisager tous les scénarios d'endommagement, [HOLME et al 02] propose d'adopter des stratégies d'attaque consistant à supprimer les composantes du réseau selon les valeurs décroissantes de centralité intermédiaire.

Cet indicateur traduit, en effet, le rôle de médiateur joué par les composantes du réseau : aussi, la suppression des arcs et des sommets enregistrant les plus fortes valeurs de centralité intermédiaire est amenée à provoquer les désordres les plus importants sur le réseau.

Dans cette perspective, nous avons envisagé seize scénarios d'endommagement, à savoir sept scénarios de rupture partielle de ligne (lignes 1, 2, 4, 6, 8, 9 et 13) et neuf scénarios de rupture de station (Châtelet, République, Concorde, Saint-Lazare, Montparnasse, Gare de l'Est, Opéra, Invalides et Bastille). Afin d'évaluer l'impact des ruptures provoquées, nous avons calculé, pour chacun de ces scénarios, les différences de centralité intermédiaire entre le réseau endommagé et le réseau normal.

Les valeurs négatives sont associées aux composantes enregistrant des déficits de charge, c'est-à-dire aux composantes endommagées et aux composantes moins fréquentées étant donnée la nouvelle configuration du réseau.

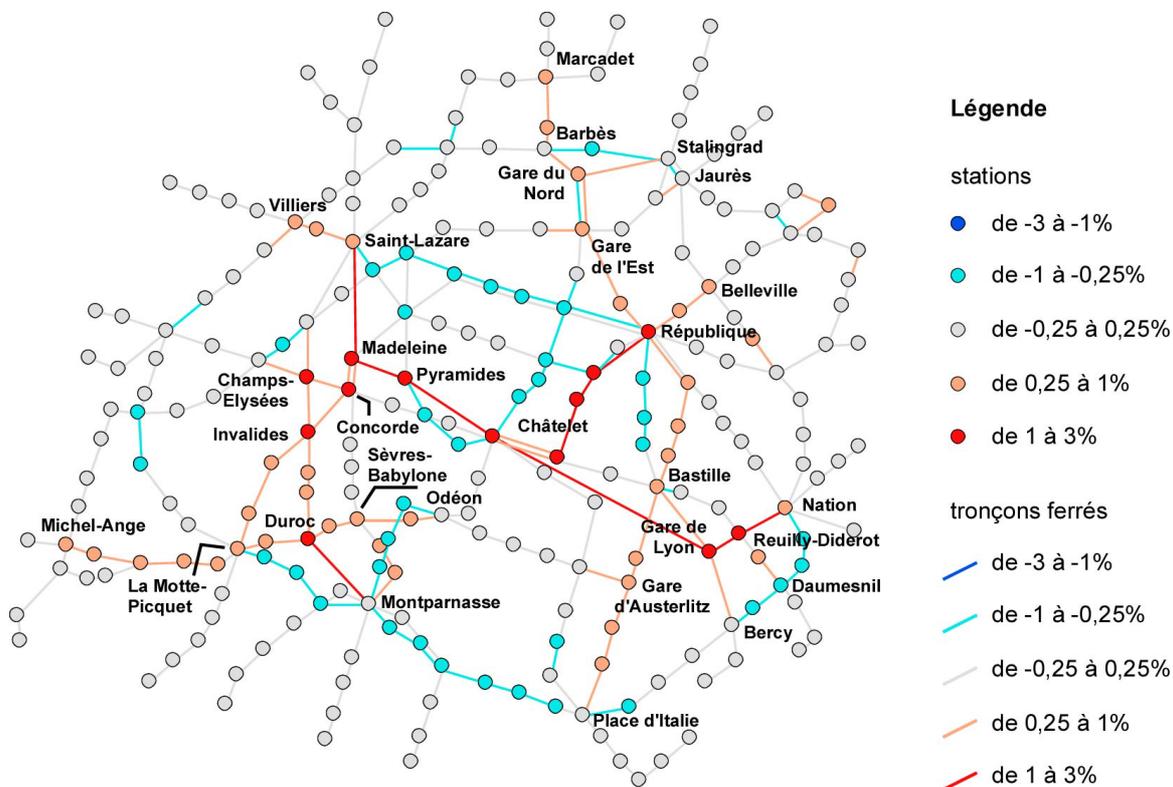


figure B.9.7

Différence entre l'indice Probit ($\beta = 0,5$, 50 simulations de Monte-Carlo par relation) et l'indice de centralité intermédiaire sur le réseau de métro parisien.

À l'inverse, les valeurs positives permettent de repérer les composantes du réseau assumant les voyageurs contraints d'effectuer des détours : en ce sens, elles mettent en valeur les chemins alternatifs empruntés pour le scénario d'endommagement considéré et par inférence les relations fonctionnelles entre les différentes lignes du réseau. En guise d'illustration, nous avons représenté les résultats obtenus pour six scénarios d'endommagement (cf figure B.9.8, page suivante).

Les écarts de centralité intermédiaire observés sur les différents scénarios font nettement apparaître l'organisation de déviations autour des composantes endommagées. Ces déviations contournent souvent un secteur plus large que celui qui a été réellement endommagé, en raison notamment de la logique de lignes du réseau de métro : en pratique, les zones enregistrant des déficits de charge s'étendent depuis le secteur endommagé jusqu'aux stations de correspondance voisines.

Par ailleurs, les déviations se ramifient parfois bien au-delà du voisinage proche du secteur endommagé : dans cette circonstance, l'étendue des chemins alternatifs dénote à la fois l'importance fonctionnelle des composantes impliquées et l'emprise des relations qu'elles contribuent à assurer en temps normal.

Un examen plus détaillé de la structure des déviations fait ressortir des points communs entre les différents scénarios et éclaire nos analyses préalables. En premier lieu, il apparaît que les déviations s'articulent conjointement sur les deux catégories d'axes que nous avons identifiés précédemment, à savoir les axes majeurs et les axes alternatifs de déplacement. Par exemple : le scénario Châtelet fait valoir l'importance des lignes 6, 8 et 13, d'une part, et des lignes 5, 10 et 12, d'autre part.

En deuxième lieu, l'étude des scénarios focalise l'analyse sur des aspects locaux du fonctionnement du réseau, ainsi que le soulignent les points suivants :

- les scénarios mettant en scène la rupture d'une station offrent la possibilité d'appréhender le rôle fonctionnel de cette station au sein du réseau. Ainsi, le scénario Saint-Lazare démontre l'enjeu de cette station dans les relations nord-sud sur le territoire. Dans un autre registre, le scénario République souligne l'importance de cette station dans le bon fonctionnement de la ligne 5 (Stalingrad - Place d'Italie) ;
- les scénarios mettent en valeur l'importance de la combinaison de lignes : l'endommagement d'une ligne peut en effet entraîner un déficit de charge sur une ligne en correspondance pourtant intacte. C'est ainsi le cas dans le scénario de la ligne 4 (nord-sud) entre cette ligne et la ligne 14 (est-ouest), dans le scénario de la circulaire 6 entre cette ligne et les axes nord-sud 13 et 5 ou encore dans le scénario de Saint-Lazare entre la ligne 12 (nord-sud) et la ligne 14 (est-ouest) ;

- les scénarios permettent de juger de la pertinence des connexions entre les différentes lignes du réseau, notamment lorsque celles-ci sont empruntées afin de réaliser des « raccords » entre des axes de déviation privilégiés. Par exemple les lignes 6 et 10 effectuent des liaisons est-ouest entre les axes nord-sud 12 et 5 dans le scénario Odéon - Réaumur, de même que la ligne 14 permet d'éviter le quartier Bastille selon la direction est-ouest dans le scénario Bastille.

En dernier lieu, l'étude des scénarios révèle l'importance de certaines lignes dans des contextes donnés, au-delà des conclusions générales issues de l'analyse des indices synthétiques.

Par exemple, la ligne 12 apparaît clairement comme un axe alternatif de déplacement lorsque la ligne 4 est endommagée (scénarios Odéon - Réaumur et Châtelet) - notamment en raison de leur double intersection de part et d'autre du territoire (au nord à Marcadet et au sud à Montparnasse). De la même manière, la ligne 7 est souvent sollicitée lorsque le fonctionnement de la ligne 5 est compromis (scénarios Montparnasse - Place d'Italie et Bastille) - également ici en raison d'une double intersection (au nord à Gare de l'Est et au sud à Place d'Italie).

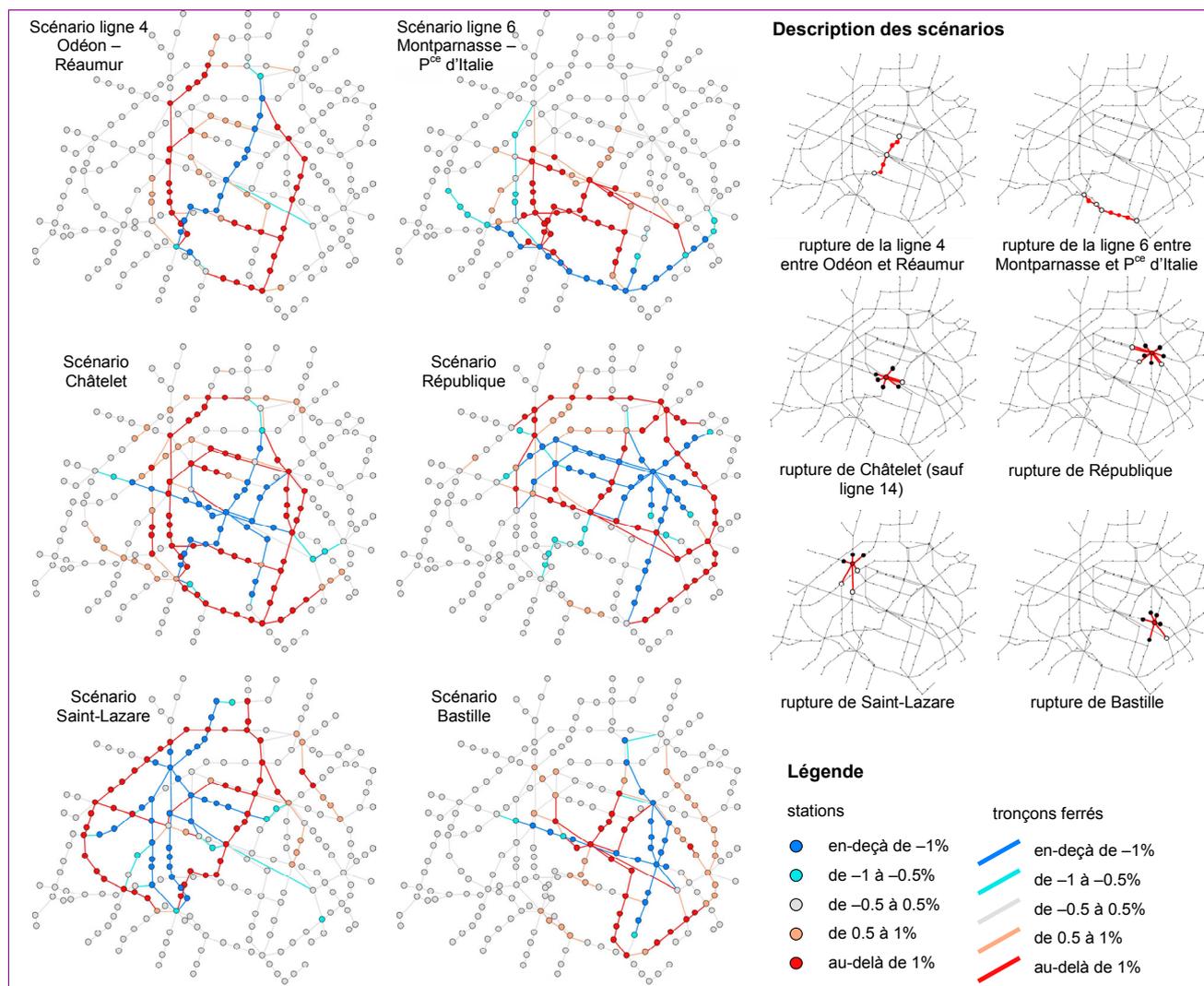


figure B.9.8

Différences d'indice de centralité intermédiaire entre six réseaux endommagés et le réseau normal.

Il serait évidemment trop long et trop fastidieux d'entrer dans le détail de tous les aspects fonctionnels soulevés par l'étude des scénarios. Nous retiendrons néanmoins que :

- les scénarios confirment l'importance fonctionnelle des axes principaux et des axes alternatifs de déplacement précédemment identifiés, mais nuancent cette distinction en les faisant intervenir conjointement dans la structure des déviations ;

- les scénarios apportent des informations complémentaires sur le fonctionnement du réseau à un niveau local en mettant en valeur des mécanismes plus complexes, comme le fonctionnement combiné de deux lignes au niveau d'une correspondance, le rôle d'une station à correspondance dans le fonctionnement d'une ligne, la réalité fonctionnelle des correspondances entre les lignes, etc ;
- les scénarios révèlent enfin des aspects du fonctionnement du réseau en mode endommagé, mais ceux-ci ne peuvent être mis en évidence par l'analyse des indices synthétiques car ils dépendent du contexte de l'endommagement et des composantes impliquées.

L'étude de scénarios d'endommagement complète donc l'analyse fonctionnelle du réseau en replaçant le rôle joué par les lignes et les stations dans différents contextes. Le choix des scénarios doit à ce titre être orienté par les conclusions sur l'importance fonctionnelle des composantes du réseau (principe des stratégies d'attaque) et par l'observation préalable de configurations topologiques particulières au sein du réseau (mise en évidence de phénomènes contextuels).

Synthèse - Perspectives

Conclusions sur le fonctionnement du réseau

À l'issue de l'étude du fonctionnement du réseau de métro selon son mode normal et selon les variantes d'endommagement, les lignes et les stations apparaissent bien différentes de ce qu'elles nous semblaient être au départ.

Le réseau ne se résume plus en effet à une juxtaposition de stations isolées et de stations à correspondance, ancrées sur le territoire et reliées par des lignes radiales, transversales ou circulaires, mais se présente comme un objet complexe, où les dynamiques de déplacement hiérarchisent le rôle fonctionnel des stations et des lignes, et induisent des relations de dépendance entre celles-ci et les différentes portions du territoire.

L'intégration du réseau de métro sur le territoire organise les relations autour d'un centre décalé vers l'ouest par rapport au centre géographique de la ville, au niveau du quartier Saint-Lazare - Opéra - Madeleine - Concorde-Invalides. Autour de ce centre, les relations s'articulent notamment sur des axes majeurs organisés de manière circumradiale (cf figure B.9.9). En particulier, se distinguent deux axes nord-sud (ligne 4) et est-ouest (ligne 1), deux circulaires au nord (ligne 2) et au sud (ligne 6) ainsi que deux axes rapides à l'ouest de la ville au niveau du centre fonctionnel (lignes 8 et 13).

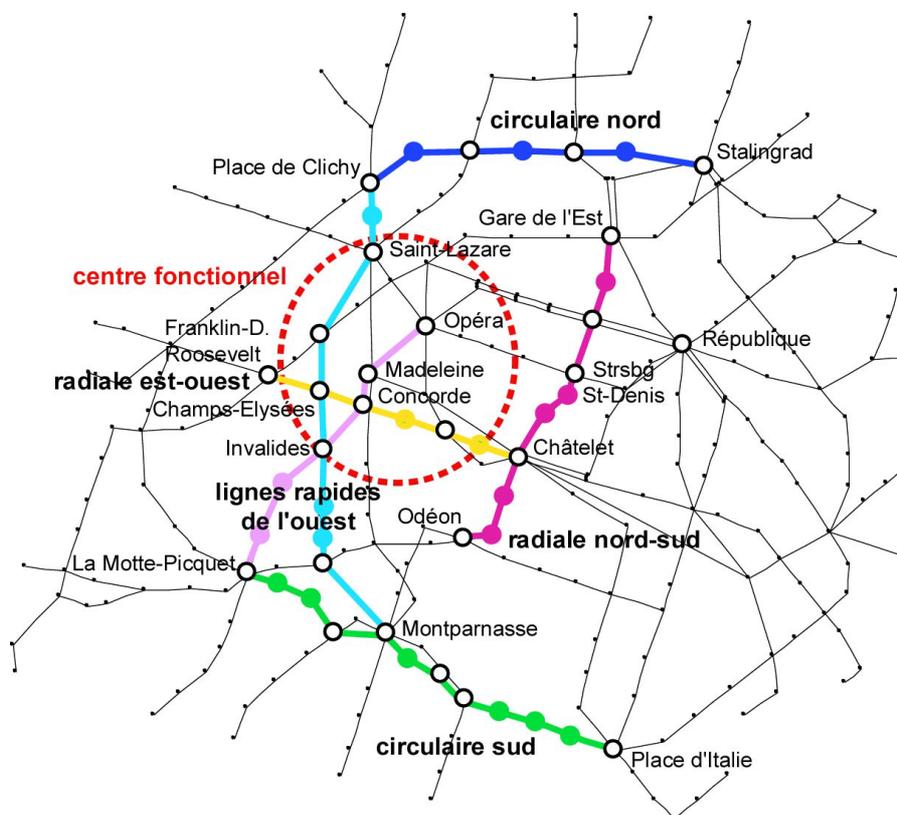


figure B.9.9 : centre fonctionnel et axes majeurs de déplacement sur le réseau de métro parisien

Les axes majeurs sont par ailleurs épaulés par des axes alternatifs, susceptibles d'assumer d'importants reports de voyageurs en cas de dysfonctionnements du réseau. Il s'agit de deux axes principaux est-ouest (Nation - Saint-Lazare) et nord-sud (Stalingrad - Place d'Italie) ainsi que plusieurs portions de lignes pénétrant dans le réseau au travers des lignes circulaires (cf. figure B.9.10).

En pratique, les valeurs d'éloignement moyen obtenues sur le métro permettent d'avoir une bonne idée de l'organisation du centre et de la périphérie du territoire parisien desservi par le métro. Il apparaît ainsi que le réseau de métro fournit les meilleurs accès à un large centre ouest de la ville, situé entre les stations Châtelet et Saint-Lazare.

D'une part, ce décalage induit un déséquilibre est-ouest, manifesté par une mauvaise accessibilité des quartiers du centre est de la ville (à l'est de la ligne 5 Place d'Italie - Stalingrad). D'autre part, la richesse des correspondances offertes par ce centre facilite les accès sur la rive droite de la ville.

À l'inverse, le réseau offre moins de possibilités sur la rive gauche et rend d'autant plus important le rôle joué par les trois grosses stations à correspondance Montparnasse, La Motte-Picquet et Place d'Italie. Ces stations, ainsi que leurs « homologues » sur la rive droite (Stalingrad, Barbès, Pigalle, Place de Clichy), constituent les points d'échange entre le centre et la périphérie du réseau, matérialisées par les lignes circulaires 2 et 6. Ces dernières marquent en effet la frontière au-delà de laquelle l'accessibilité des stations est rendue difficile du fait de leur position sur les extrémités des lignes.

Partant de ces constats généraux sur l'efficacité du réseau de métro dans la desserte du territoire parisien, nous allons maintenant analyser la fonctionnalité de ses composantes en configuration normale. Ceux-ci opèrent dans des contextes bien définis : ainsi l'axe Nation - Saint-Lazare pour les relations est-ouest, la ligne 5 pour les relations nord-sud ainsi que plusieurs axes pénétrants (en particulier les lignes 10 et 11) pour s'affranchir des circulaires. Cette configuration ne dispense pas d'envisager des scénarios d'endommagement bien précis afin d'identifier et de protéger au mieux les alternatives.

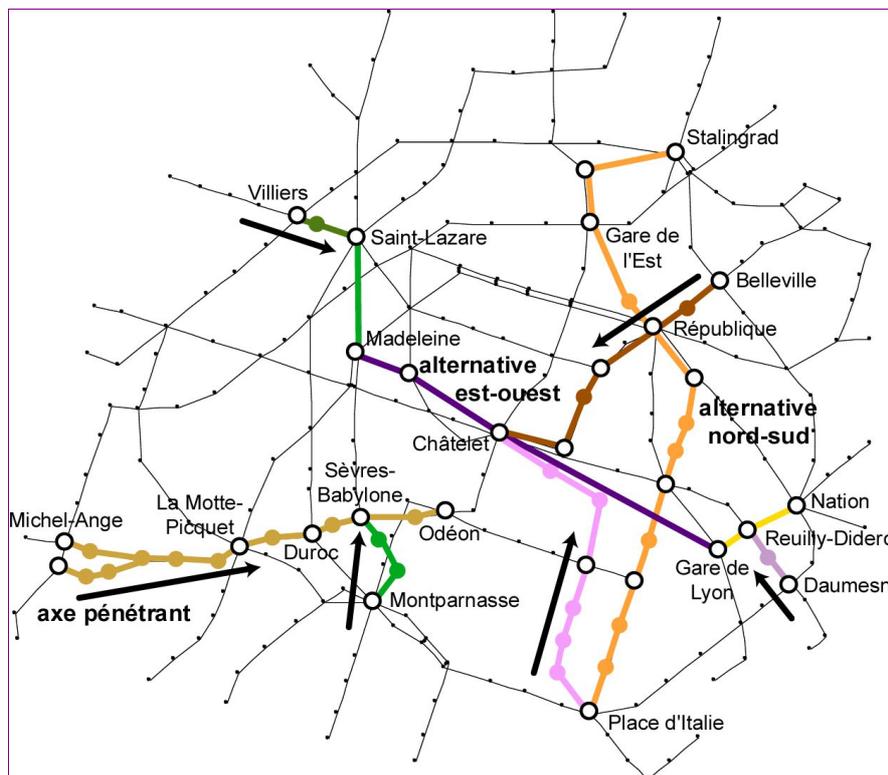


figure B.9.10 : principaux axes alternatifs de déplacement sur le réseau de métro parisien

Perspectives sur l'analyse du fonctionnement du réseau

Les travaux présentés ici proposent une méthode d'étude du fonctionnement du réseau, non seulement en mode normal, mais également dans l'éventualité de dysfonctionnements. L'analyse préalable des flux dans une logique de chemins alternatifs permet d'anticiper les potentialités du réseau en cas de dysfonctionnements, mais cette analyse doit raisonnablement être complétée par une étude de scénarios d'endommagement judicieusement choisis.

Cette étude du fonctionnement du réseau de métro parisien amorce par ailleurs d'autres pistes de recherche concernant :

- les stratégies d'attaque. Jusqu'à présent, celles-ci sont dictées par la simple considération des indices de centralité intermédiaire. Cependant, le contexte topologique des stations candidates à la suppression est un argument important dans la stratégie d'attaque, et de rapides calculs montrent que l'endommagement des stations République et Montparnasse - extérieures au centre fonctionnel du réseau - est autrement plus préjudiciable que celui de Concorde ou d'Opéra (en termes de détours à effectuer par les voyageurs). À ce titre, l'analyse des scénarios d'endommagement devra inclure une comparaison des mesures d'efficacité (indices d'éloignement moyen aux niveaux local et global) afin de quantifier l'impact des dysfonctionnements et d'apprécier la vulnérabilité des composantes du réseau ;
- la description du rôle fonctionnel des composantes du réseau. Nous avons vu que Saint-Lazare intervenait pour effectuer des mises en relation globalement orientées nord-sud. Dans cette logique, il serait intéressant d'identifier les relations transitant par une composante donnée et d'en exploiter les informations pour analyser l'intégration de la composante dans le fonctionnement global du réseau ;
- les effets d'échelle. Les relations envisagées sur le territoire opèrent à des échelles très variées, aussi il pourrait être instructif de hiérarchiser le réseau en fonction de l'étendue des relations que les composantes assurent. À cette occasion, le réseau gagnerait à être complété par les lignes de RER afin de confronter l'analyse à la réalité de l'organisation hiérarchique des transports en commun.

Ces pistes sont le fondement de nos travaux actuels. À terme, nous envisageons de transposer les résultats obtenus aux réseaux routiers.

Remerciements

Nous tenons à remercier Marie Fouillet pour sa contribution, ses idées et son enthousiasme tout au long de ce stage. Notre gratitude va également à Alain L'Hostis du laboratoire TRACES de l'INRETS pour son aide précieuse dans l'utilisation du logiciel MAP [LHOSTIS, MATHIS, CHAPELON 01] pour la réalisation des cartes d'indicateurs présentées dans cet article.

Références

- [ANTISÈCHE 01] *L'Antiséche du Métro - Quais, sorties, plans des rues et numéros, couloirs de correspondance*, CBHM Editions, 54 pages, 2001.
- [CHAPELON 96] Laurent Chapelon : *Modélisation multi-échelles des réseaux de transport : vers une plus grande précision de l'accessibilité*, in revue Mappemonde, 3/96, pp. 28-36, 1996.
- [COROLLER 02] Pierre Coroller : *Etude des stations du métro parisien*, rapport préliminaire de DESS : Cartographie, Ecole Nationale des Sciences Géographiques, Marne-la-Vallée, 35 pages, juillet 2002.
- [FOUILLET 02] Marie Fouillet : *Étude de l'efficacité d'un réseau de transport - Application au réseau métropolitain parisien*, rapport de stage de fin d'études IUP Génie Mathématique et Informatique de l'université Paris IX Dauphine, réalisé au sein du laboratoire COGIT de l'IGN, 94 pages + annexes, laboratoire COGIT, IGN-SR-02-001-S-STA-MF, avril-septembre 2002.
- [FREEMAN 78] C. Linton and Freeman : *Centrality in social networks - Conceptual clarification*, Social Networks, n°1, pp. 215-239, 1978/79.
- [HOLME et al 02] Petter Holme, Beom Jun Kim, Chang No Yoon & Seung Kee Han : *Attack vulnerability of complex networks*, Trafficforum : www.trafficforum.org/index.html, 13 pages, février 2002.
- [LHOSTIS, MATHIS, CHAPELON 01] Alain L'Hostis, Philippe Mathis & Laurent Chapelon : *Logiciel MAP - Modèle d'images de synthèse et de cartographie pour l'aménagement des transports*, laboratoire du Centre d'Etudes Supérieures d'Aménagement de Tours, site <http://mapnod.inrets.fr>, mai 2001.
- [PUMAIN, SAINT-JULIEN 97] Denise Pumain & Thérèse Saint-Julien : *L'analyse spatiale (1) : Localisations dans l'espace*, Cours-géographie, Editions Armand-Colin, France, 167 pages, 1997.
- [SHEFFI 85] Yosef Sheffi : *Urban Transportation Networks : Equilibrium analysis with mathematical programming methods*, Prentice Hall, New Jersey (USA), 400 pages, 1985.

Publications

- [GLEYZE 00] J.-F. Gleyze : *Apport de l'information géographique dans l'analyse de risques – Applications à l'étude des perturbations du réseau routier à la suite de catastrophes*, in Bulletin d'Information de l'IGN, Activité recherche 2000, n°72, pp. 69-84, laboratoire COGIT, IGN-SR-00-004-S-ART-JFG, 2000.
- [GLEYZE 01a] J.-F. Gleyze : *Etude topologique de la fonctionnalité des réseaux*, in Actes des Journées Cassini 2001 : « Géomatique et espace rural », 18 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-041-S-ART-JFG, septembre 2001.
- [GLEYZE 01b] J.-F. Gleyze : *Les dommages induits par les coupures du réseau routier - Eléments de recherche pour l'évaluation de la fiabilité d'un réseau routier*, in Actes de la conférence Risques d'accidents et risques environnementaux dans les transports routiers, Besançon (F), 15 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-042-S-COM-JFG, octobre 2001.

B.10 « Oxygène » : une plate-forme inter-opérable pour le déploiement de services Web géographiques

Thierry Badard & Arnaud Braun

Introduction

Le développement d'applications Web, s'appuyant sur des données géographiques doit encore, de nos jours, faire face à de nombreux problèmes :

- le principal frein à un tel développement vient du manque d'interopérabilité entre les différents modèles de données géographiques mis en œuvre dans les logiciels SIG commerciaux, même si des efforts conséquents sont entrepris par l'ISO et l'OpenGIS pour les unifier et standardiser cette représentation commune. Une application développée sur un modèle non standard peut ainsi ne pas être réutilisable sur un autre système, sans y opérer des modifications conséquentes ;
- un autre problème majeur est que les langages de programmation liés aux logiciels SIG du marché sont très souvent des langages propriétaires. Outre le fait qu'ils nécessitent un long apprentissage afin d'en tirer parti, ils empêchent tout partage de code entre différents systèmes. On est alors obligé de coder plusieurs fois le même algorithme afin qu'il puisse fonctionner sous différentes plates-formes. De plus, les utilisateurs sont fortement dépendants des évolutions technologiques que peut entreprendre l'éditeur du logiciel SIG. La pérennité des développements n'est donc pas assurée. Le meilleur exemple que l'on puisse prendre pour illustrer cette situation est celui du passage du langage Avenue à Visual Basic opéré par ESRI sur son logiciel ArcView (renommé ArcGIS) ;
- une autre entrave au développement d'applications géographiques sur le Web est que, sans acheter des modules additionnels relativement onéreux, la plupart des logiciels SIG commerciaux ne sont pas conçus nativement pour mettre en œuvre de telles solutions. De plus, lorsqu'ils sont dotés de fonctionnalités Internet, celles-ci se limitent à la mise à disposition de données géographiques (exemple : interfaces de consultation de données en ligne) mais ne permettent pas la distribution de traitements ou de processus (possibilité d'appeler à distance des algorithmes hébergés sur des serveurs - notion de service Web -, évitant ainsi aux développeurs d'avoir à les coder ou à être dans l'impossibilité de réaliser son application, le traitement faisant appel à des techniques qu'il ne maîtrise pas forcément) ;
- enfin, le fait que les SIG ne soient pas de véritables SGBD (Systèmes de Gestion de Bases de Données) constitue une difficulté supplémentaire. Les problèmes de concurrence d'accès (possibilités de répartition de charge et de clustering) ou de gestion de la sécurité ne sont bien souvent pas adressés par les logiciels SIG du marché. Déployer des applications Internet sur de tels systèmes peut ainsi entraîner de nombreux problèmes d'efficacité, de rapidité et de cohérence.

Le développement d'applications géographiques (Web ou pas) peut ainsi impliquer des coûts conséquents pour les utilisateurs (formation, implémentation, ré-ingeneering, prix des licences...).

Le laboratoire COGIT n'a pas échappé à ces problèmes. En effet, au cours des dix dernières années, trois plates-formes de développement ont été mises au point en interne, afin de permettre aux chercheurs de répondre à leurs besoins de recherche :

- *PlaGe* (Plateforme de Généralisation) [LECORDIX et al 97] : entièrement développée en ADA, elle a été conçue pour mettre au point les processus de généralisation cartographique peu contextuels (routes et bâti isolé) ;
- *StratèGe* (Stratégies pour la Généralisation) : bâtie au dessus du moteur de système Expert SMECI vendu à l'époque par ILOG et développée en Le-Lisp (un Lisp propriétaire), elle a permis de coder les recherches en généralisation contextuelle [RUAS 98] ;
- *GéO₂* [RAYNAL et al 95] : système de gestion de bases de données géographiques, orienté-objet, développé au dessus du SGBD O₂ (O₂ Technology, à l'époque également car il n'est plus commercialisé et maintenu), principalement en O₂C (un C/C++ propriétaire) qui a abrité et abrite encore, les recherches en gestion de l'information géographique (appariement, mise à jour, troisième dimension, échelles multiples, gestion du temps...).

Cette diversité de systèmes et de langages ne pouvant pas communiquer entre eux a impliqué bien souvent de développer le même algorithme dans les différentes plates-formes. Les codes n'étant pas, pour la plupart, centralisés ou maintenus et documentés, ces mêmes traitements se sont vus implémentés plusieurs fois, au fil des personnes qui se sont succédées au laboratoire COGIT. Les systèmes utilisés en production ou à l'extérieur de l'IGN, étant pour la plupart des logiciels SIG commerciaux, le reversement des codes de recherche était rendu très difficile, voire impossible (modèles de données très divergents et temps d'apprentissage des langages trop longs). De plus, ces prototypes ont fait face à de gros problèmes de charge (volume de données gérable et rapidité des traitements), rendant ainsi peu rentable le déploiement tel quel de ces systèmes.

Afin de surmonter ces problèmes, de nombreuses technologies notamment en génie logiciel ont récemment émergé : des langages de programmation standardisés et extensibles, orientés objet, munis de capacités de communication sur les réseaux comme Internet (exemple : Java [SUN 02a]), des techniques de modélisation basées sur la notion de composants logiciels (exemple : UML - Unified Modelling Language [OMG 02]), des SGBD objet-relationnel permettant le stockage et l'interrogation de données géographiques (exemple : Oracle [ORACLE 02], PostGIS [POSTGIS 02]), etc.

Essayant de tirer profit de ces outils de plus en plus matures, le laboratoire COGIT a entrepris de concevoir et mettre en œuvre une nouvelle plate-forme inter-opérable de développement, visant à centraliser et pérenniser les travaux de recherche ainsi qu'à faciliter le reversement éventuel d'une partie des résultats auprès des unités de production de l'IGN. Cette plate-forme devant « donner de l'air » aux développements du laboratoire, elle a été baptisée OXYGENE. Elle vient compléter la plate-forme AGENT [BARRAULT et al 01], [DUCHÊNE, RUAS 01] qui centralise maintenant les recherches en généralisation.

Cet article vise à présenter OXYGENE. L'architecture générale de cette nouvelle plate-forme sera tout d'abord décrite et les différents composants autour desquels elle est bâtie seront détaillés. Le modèle-objet constituant le cœur d'OXYGENE sera ensuite présenté et illustré par un exemple de mise en œuvre. Enfin, un bilan sur l'état actuel des développements et sur ceux à venir sera dressé.

L'architecture d'OXYGENE

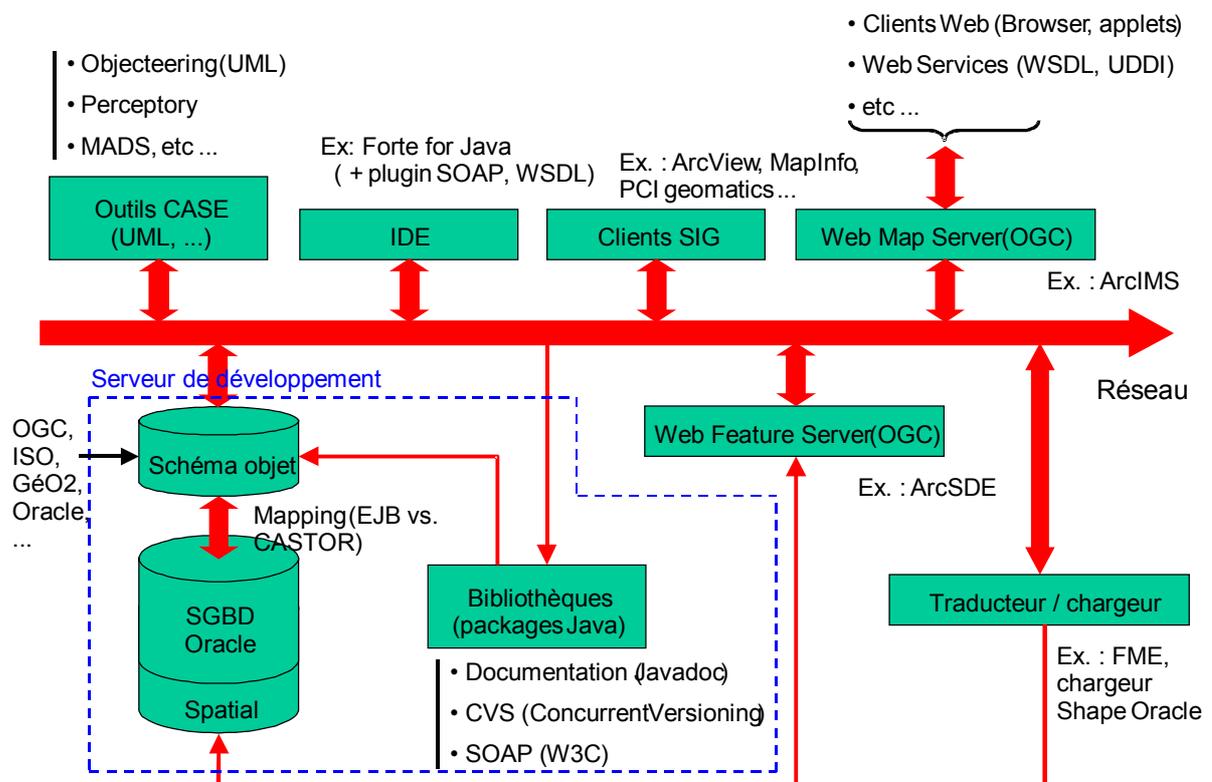


figure B.10.1 : architecture d'OXYGENE

La plate-forme OXYGENE est articulée autour du réseau (Internet ou Intranet). Les différents composants de l'architecture sont les suivants :

Le modèle orienté-objet

Un *schéma-objet* a été spécifié et développé pour décrire l'information géographique sous toutes ses facettes, et notamment :

- *la sémantique* : comment décrire les éléments géographiques (routes, bâtiments, etc), et les relations entre ces éléments ;
- *la géométrie* : comment décrire les primitives géométriques (points, lignes, surfaces) et des structures plus complexes (partages de géométrie, géométries composées de plusieurs primitives) ;
- *la topologie* : comment décrire les relations spatiales (adhérence et inclusion) entre les objets.

Chaque utilisateur enrichit ce modèle de base par un *modèle adapté à une application* (schéma utilisateur). Par exemple : un modèle pour représenter les spécifications, un modèle pour l'appariement, un modèle pour les évolutions, un modèle pour certaines études de risques, une vue particulière d'un jeu de données, etc. Un premier schéma utilisateur développé par les chercheurs du laboratoire COGIT est celui basé sur le modèle des cartes topologiques [DAVID 91], qui s'appuie de façon transparente sur le modèle cœur d'OXYGENE.

Le modèle de base s'appuie sur les standards de l'ISO et de l'OGC (Open GIS Consortium, organisation qui regroupe tous les grands acteurs de l'information géographique dans le monde : producteurs et utilisateurs de données, éditeurs de logiciels SIG). En outre, l'expérience de la plate-forme GéO₂ a été capitalisée [RAYNAL et al 95]. S'appuyer sur des standards permet l'interopérabilité pour l'échange des données et des traitements, et garantit une certaine pérennité de la plate-forme.

Ce modèle existe par lui-même, en dehors de toute implémentation. Il a été décrit à l'aide du formalisme UML (Unified Modelling Language : langage standardisé, orienté objet, pour modéliser les applications [OMG 02]) et saisi dans un atelier de génie logiciel (AGL). Il est décrit plus en détail dans la suite de l'article.

Le modèle a été entièrement implémenté avec le langage orienté-objet Java [SUN 02a]. Ce langage a été choisi pour plusieurs raisons : sa simplicité, sa portabilité (une même application peut s'exécuter sur différents systèmes d'exploitation sans en modifier la moindre ligne de code), la richesse de ses bibliothèques, sa dynamique, sa pérennité, ses possibilités de liaison aux bases de données, et son ouverture sur le monde du Web.

La bibliothèque d'opérateurs

Les opérateurs s'appuient sur la structure du modèle et sont codés dans une bibliothèque indépendante. Qu'entend-on par opérateur ? Il s'agit de traitements de plus haut niveau que les méthodes de base qu'on peut trouver sur les classes du modèle. Par exemple, le modèle contient une classe *polyligne*. Une méthode *longueur* a été codée sur cette classe : on reste au niveau du modèle. Par contre, le calcul d'une triangulation sera un opérateur, s'appuyant sur la structure du modèle.

La séparation modèle/opérateur permet d'assurer l'indépendance des développements. La plupart des développements seront codés en Java. Mais on peut récupérer en l'état des programmes externes, qui ont déjà nécessité un long travail. Ainsi, on évite les recodages inutiles. Par exemple, on peut récupérer les travaux de généralisation de la plate-forme PlaGe, écrits en Ada ou des travaux divers, sur Internet notamment, comme un programme de triangulation en C ou un programme de calcul de MNT en Fortran, etc.

Ceci est particulièrement intéressant pour les programmes demandant de gros calculs : codés en Java, ils seraient trop lents à exécuter. Quand on récupère un programme externe, il ne reste qu'à écrire la conversion entre le format « modèle » et le format demandé par ce programme. La conversion s'écrit dans un programme Java et utilise les fonctionnalités de l'interface JNI (Java Native Interface) [SUN 02c] qui permet les liaisons avec des langages autres que Java.

Le système de gestion de bases de données (SGBD)

Les SIG classiques gèrent eux-mêmes le stockage et la manipulation de leurs données, mais ne sont pas des SGBD à proprement parlé. Les problèmes de concurrence d'accès, de gestion de la sécurité ou encore le stockage de volume de données conséquents ne sont bien souvent pas gérés par les logiciels SIG du marché. L'idée est donc ici d'utiliser un outil pour ce pour quoi il est bon et on a donc retenu une solution basée sur un SGBD.

Il est relationnel car les SGBD orientés-objet ont montré leurs limites en terme de performance (mauvaise tenue à la montée en charge, temps prohibitifs de réponse aux requêtes). Oracle est le SGBD retenu pour OXYGENE. Oracle est muni d'une extension spatiale qui lui permet de manipuler efficacement l'information géométrique, sous une forme « objet » depuis la version 8i [ORACLE 02]. Par ailleurs, la structure modulaire de la plate-forme permettrait d'utiliser tout autre SGBD capable de stocker de l'information géographique. On pense notamment à PostGIS, extension du SGBD open source PostgreSQL supportant l'information géographique [POSTGIS 02].

Le lien objet-relationnel (ou mapping)

Oracle est un SGBD relationnel qui possède certes quelques fonctionnalités « objet », mais qui reste fondamentalement relationnel. Le modèle implémenté en java est entièrement orienté-objet. Faire le lien entre les deux mondes est nécessaire : on appelle ceci le "mapping". Deux technologies ont été envisagées : utiliser des EJB (Entreprise Java Beans, version 1) ou utiliser la norme en cours de spécification JDO (Java Data Object) [SUN 02b].

Si les EJB sont conçus pour faciliter les activités de déploiement de composants logiciels sur le Web, JDO est plus simple et plus efficace pour une utilisation quotidienne et ne reste pas incompatible avec la première. C'est la solution retenue. Pour ce faire, on utilise une API Java open source appelée *Castor* [CASTOR 02], dont on a retouché le code pour l'adapter à nos besoins (ce que permet de faire un produit open source en plus d'être dans ce cas gratuit).

Les correspondances entre les deux mondes (c'est-à-dire : la classe d'objets « TronconRoute » apparaît dans le SGBD comme une table « TRONCON_ROUTE ») sont faites à l'aide de fichiers XML (eXtensible Markup Language : langage de description de contenu de documents structurés, adaptés à des échanges d'informations diverses et réparties sur des réseaux comme Internet) [W3C 00b]. Grâce à ceci, nos programmes Java ne manipulent pas directement les tables Oracle et on peut continuer à raisonner entièrement en orienté-objet. La structure modulaire d'OXYGENE permettrait d'utiliser tout autre outil de mapping, en ne retouchant que faiblement le code.

Le serveur de développement

Les développements sont documentés via un outil permettant de générer automatiquement la documentation à partir de commentaires insérés dans le code [SUN 02d]. Ainsi, la cohérence est assurée entre développements et documentation. La documentation résultante apparaît sous forme de pages Web. Le code est partagé entre les différents chercheurs grâce à CVS (Concurrent Versioning System) [CVS 02]. Cet outil centralise les codes sur un serveur.

Chaque utilisateur peut charger les mises à jour et écrire ses propres mises à jour du code. Des conflits éventuels sont signalés et des outils sont à disposition pour les résoudre et ainsi assurer le maintien de la cohérence. L'historique est conservé. L'accès à la documentation de nos développements, à des documentations complémentaires (afin de faciliter l'apprentissage des techniques embarquées) et au CVS se fait sur un serveur Web accessible en interne (<http://oxygene.ign.fr>, site de la plate-forme OXYGENE).

L'atelier de génie logiciel (AGL) (ou outil CASE : Computer Aided Software Engineering)

La conception d'une application passe tout d'abord par sa modélisation. Cette étape peut être facilitée par les outils de génie logiciel (AGL), qui permettent de saisir des schémas conceptuels et de les transformer en schémas logiques en fonction des SGBD ou des langages de développement cibles. Ils existent différents outils tant sur le marché qu'en open source. Nous avons retenu Objecteering [OBJECTEERING 02].

Il permet de faire des modélisations objets en UML [OMG 02]. Il permet de générer automatiquement du code Java à partir d'un modèle UML, de récupérer du code Java pour reconstruire un modèle (ré-engineering), et aussi de générer de la documentation. Tous les aspects d'UML sont couverts (diagrammes de classe, de séquence, d'utilisation, etc). C'est un puissant outil d'aide à la conception. Bien utilisé, il aide à affiner sa modélisation et permet de gagner du temps à l'implémentation.

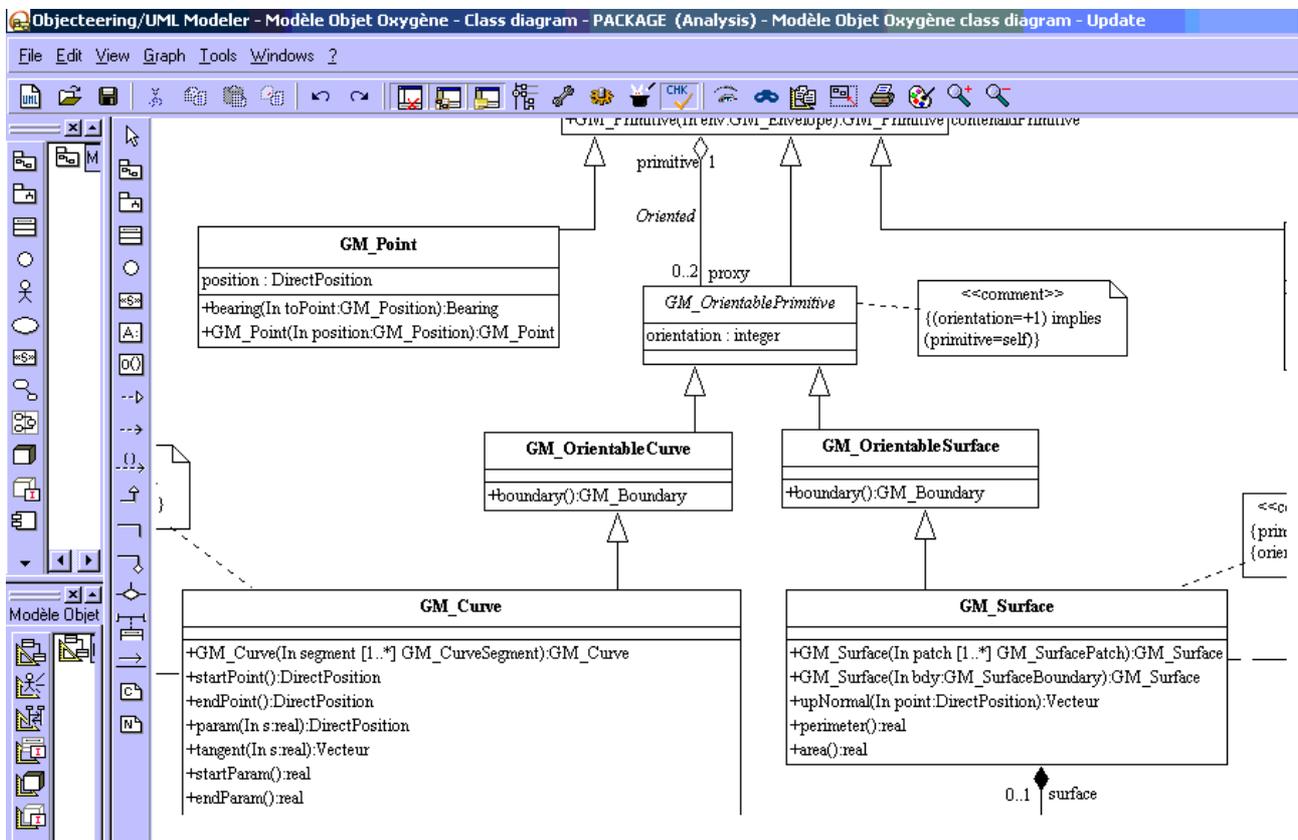


figure B.10.2 : copie d'écran du logiciel Objecteering

L'environnement de développement intégré

Afin de faciliter les développements, OXYGENE est muni d'un IDE (Environnement de Développement Intégré). Ce sont des logiciels bien connus des programmeurs qui permettent d'éditer du code, de le compiler, de l'exécuter, de le déboguer, de gérer le partage de code en tant qu'utilisateur CVS, de visualiser le contenu des tables du SGBD, d'exécuter des requêtes dans le SGBD.

L'IDE utilisé au laboratoire COGIT est actuellement Sun™ One Studio (anciennement Forte™) [SUN 02e], un produit gratuit, dans sa version Community Edition, de Sun™ Microsystems. Des tests sont en cours concernant Eclipse, l'IDE open source d'IBM [ECLIPSE 02] dont le principal avantage par rapport à Forte™ est son ouverture indéniable pour le développement de services Web, ainsi qu'un grand nombre de plugins pour la plupart gratuits, augmentant ses capacités (modélisation UML, par exemple : [OMONDO 02]).

Le traducteur

Les données sont généralement fournies dans un des formats du marché (ESRI Shapefile, MapInfo MIF/MID, GeoConcept, etc). Il va falloir les charger dans le SGBD Oracle. Pour cela, on utilise un logiciel appelé traducteur. Il permet aussi d'exporter les données depuis Oracle vers un autre format, rendant les résultats de traitements disponibles auprès de n'importe quelle plate-forme SIG. Le logiciel utilisé sera FME (Feature Manipulation Engine) [SAFE 02].

La visualisation des données

La visualisation peut se faire à l'aide d'un simple Viewer ou avec un des SIG classiques du marché (MapInfo, GeoConcept, ESRI) qui prévoient tous des moyens de se connecter à Oracle. On peut alors profiter de toutes les puissantes fonctions d'affichage et d'analyse de ces produits. Un viewer est néanmoins en cours de développement au laboratoire, afin de pouvoir visualiser et accéder aux propriétés des objets dynamiquement (i.e. depuis et à l'intérieur d'un programme Java en cours d'exécution), entièrement en objet et non plus en relationnel, comme le permettent les outils précédents car accédant au SGBD directement. Il est basé principalement sur les outils open source développés par le projet Geotools [GEOTOOLS 02].

Web Feature Server et Web Map Service

Un "Web Feature Server" (WFS), spécifié par l'OGC [OGC 01b] permet de connecter des entrepôts de données géographiques pour les mettre à disposition des utilisateurs via le Web. L'outil permet de manipuler les données : création, destruction et mise à jour de données, requêtes. L'OGC édite des spécifications pour garantir l'interopérabilité. Dans la plate-forme actuelle, nous n'utilisons pas de WFS mais l'architecture le permet. ESRI ArcSDE est un exemple de WFS. De tels WFS existent également en open source.

Un "Web Map Service" (WMS), tel que défini par l'OGC [OGC 01c], produit une carte à partir de données géographiques dans un navigateur Web, une carte étant ici une représentation visuelle des données et non les données elles-mêmes. Les cartes peuvent être dans un format image (exemple : GIF - Graphics Interchange Format -, JPEG - Joint Photographic Experts Group -) ou dans un format vecteur (exemple : SVG - Scalable Vector Graphics - [W3C 01b]). ESRI ArcIMS est un exemple de WMS. Dans la plate-forme actuelle, nous n'utilisons pas de WMS mais l'architecture modulaire d'OXYGENE le permet.

Vers les services Web

Un service Web [W3C 02] est une technologie permettant à des applications de dialoguer à distance via Internet, et ceci indépendamment des plates-formes et des langages sur lesquelles elles reposent. Ils ont été conçus pour faciliter les échanges de données, mais aussi l'accès aux applications au sein des entreprises mais surtout entre les entreprises. Pour ce faire, les services Web s'appuient sur un ensemble de protocoles standardisant les modes d'invocation mutuels de composants applicatifs : WSDL et SOAP.

Spécifié par le World Wide Web Consortium, SOAP (Simple Object Access Protocol) [W3C 00a] définit un protocole permettant des appels de procédures à distance (RPC) s'appuyant principalement sur les standards HTTP pour le transport des messages, et XML [W3C 00b] pour la structure des messages.

Par rapport à d'autres protocoles, il a l'avantage d'une réelle portabilité (indépendant de la machine et des langages de programmation). WSDL [W3C 01a], quant à lui, fournit un mode de description des composants applicatifs (nom des méthodes, paramètres et valeur de retour de celles-ci, etc) permettant d'invoquer leurs fonctions à distance par l'échange de messages au format SOAP. Il s'agit donc d'un langage qui standardise les schémas XML utilisés pour établir une connexion entre émetteurs et récepteurs.

Il s'agit pour nous de proposer des services Web géographiques, c'est-à-dire de mettre à disposition nos traitements sur le réseau Internet. L'architecture de la plate-forme prévoit le déploiement de tels services Web *via* WSDL et SOAP.

L'architecture d'OXYGENE étant maintenant détaillée, la section suivante s'attache à présenter le modèle objet, cœur de la plate-forme et à illustrer sa mise en œuvre au travers d'un exemple.

Le modèle de données

Description du modèle

Ce modèle reprend les normes de l'ISO (groupe de travail TC 211). Certaines de ces normes sont parues, d'autres sont encore en cours de validation. Les normes ISO sont étroitement liées aux spécifications de l'OGC :

- *ISO 19107* : représentation de la géométrie et de la topologie. C'est un ensemble de packages (i.e. des groupes de classes) regroupés dans le module "Spatial". La norme a été un peu modifiée pour une plus grande facilité d'utilisation [OGC 01a] ;
- *ISO 19109* : méta-modèle permettant de construire un schéma géographique, c'est-à-dire le méta-modèle pour les classes géographiques. C'est un ensemble de méta-classes regroupées dans le package "Dico". Ces classes constituent le dictionnaire des données (c'est-à-dire le type des attributs, l'ensemble de ses valeurs possibles, etc ... [ISO 01a] ;
- *ISO 19111* : traite des systèmes de coordonnées et des projections. Cette norme n'est pas implémentée actuellement (car non encore finalisée) et sera représentée par une seule classe abstraite, dans le package « SRC » [ISO 01b] ;
- *ISO 19115* : méta-données. Une partie du modèle complet de méta-données défini par l'ISO a été implémenté. Ces classes sont regroupées dans le package "Metadata" [ISO 01c]. Seules les plus pertinentes et correspondant à ce que l'on peut communément trouver à l'IGN ou en dehors de l'Institut, ont été codées. Les évolutions dépendront des recherches traitées dans les actions de recherche sur la consultation et l'unification des bases de données géographiques.

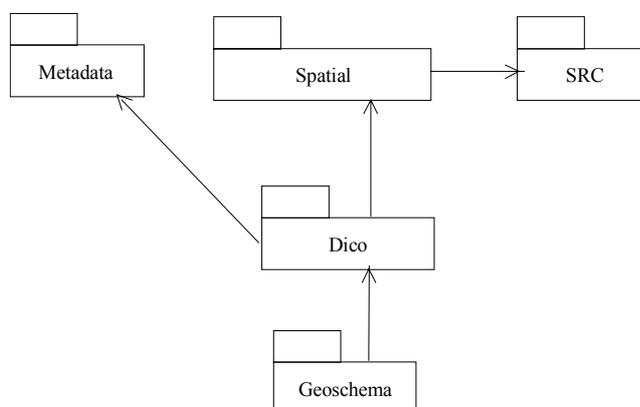


figure B.10.3 : diagramme de package du modèle (formalisme UML)

Concrètement, un utilisateur définira son schéma géographique pour ses données géographiques dans le package « Geoschema », à l'aide du méta-modèle du package "Dico". Les classes géographiques seront caractérisées par des attributs, des opérations et des associations. Parmi les attributs d'une classe, on trouve des attributs sémantiques, un ou des attributs géométriques et topologiques (c'est pourquoi le package "Dico" dépend du package "Spatial"), et éventuellement un ou des attributs de méta-données (c'est pourquoi le package "Dico" dépend du package "Metadata"). La géométrie dépendant d'un système de coordonnées, le package "Spatial" dépend du package "SRC" (système de coordonnées).

La classe mère pour les classes géographiques s'appelle *FT_Feature* (un *feature* étant défini dans la norme ISO comme la plus petite quantité d'information géographique, comme la brique de base). Les objets géographiques possèdent, en général, une ou plusieurs géométries et une ou plusieurs topologies. On appelle *GM_Object* la classe représentant les objets géométriques, et *TP_Object* la classe représentant les objets topologiques.

Un objet géométrique (*GM_Object*) peut être, soit une primitive (point, polygone, surface), soit un groupe de primitives structuré ou non. La structuration de groupes de primitives permet de gérer les partages de géométrie.

Un objet géométrique est défini par des coordonnées et par un système de coordonnées. Le système de coordonnées est défini par un identifiant, normalisé par l'OGC (par exemple : 41 014 pour le Lambert II étendu). Le modèle est aussi prévu pour gérer le 3-D.

TP_Object est la classe mère pour la topologie. La topologie d'OXYGENE reprend la structure habituelle de graphe : il existe des brins (*TP_Edge*) définis par un nœud final et un nœud initial (*TP_Node*), et des faces (*TP_Face*), les brins ayant une face gauche et une face droite. *TP_Object* et *GM_Object* sont en relation 1-1.

La topologie est vue comme une couche d'un niveau d'abstraction supérieur à la géométrie : on accède à la géométrie depuis la topologie. *FT_Feature* et respectivement *GM_Object* et *TP_Object* sont en relation n-m : un objet géographique peut avoir plusieurs géométries (multi-représentations) et une géométrie peut pointer sur plusieurs objets géographiques (cas des partages de géométrie). Ces relations sont navigables dans les deux sens.

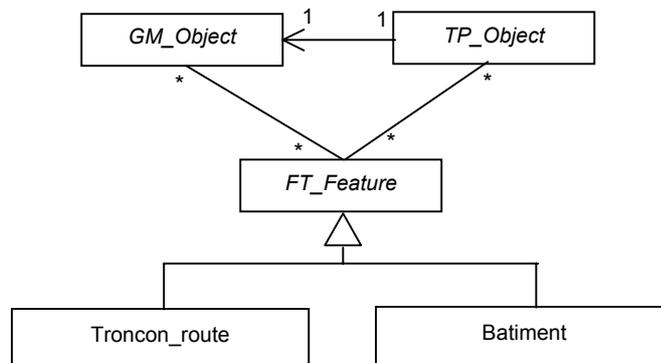


figure B.10.4 : classes-mères du modèle (formalisme UML)

Exemple d'utilisation

Prenons une classe géographique de tronçons de routes de la BD Topo et voyons son intégration dans les différentes composantes de la plate-forme. Sur la figure de la page suivante apparaissent successivement la même classe :

- dans un modèle UML ;
- codée en Java ;
- comme élément d'un fichier de mapping objet-relationnel XML ;
- comme une table Oracle ;
- et sa visualisation dans un Viewer.

Deux approches sont possibles pour générer ces différents aspects d'une même classe :

- si on charge un jeu de donnée existant, alors l'information initiale est contenue dans les tables Oracle. Un outil développé permet alors de générer les classes Java et le fichier de mapping à partir de cette information ;
- si au contraire on souhaite implémenter un modèle, alors on part de l'atelier de génie logiciel pour générer le squelette des classes Java. À partir de là, des outils semi-automatiques peuvent aider à générer la structure relationnelle du modèle et le fichier de mapping. Ce sont des phases délicates d'une implémentation.

Conclusion

OXYGENE est maintenant utilisée au laboratoire par les actions de recherche sur l'unification des bases de données, sur la gestion des évolutions dans les systèmes d'information géographique et sur l'étude des risques. Des premières applications ont commencé à être construites avec cette nouvelle plate-forme et à fournir des résultats intéressants et très encourageants. Il reste de nombreuses améliorations à apporter et notamment améliorer les performances (les phases de lecture et d'écriture dans les bases sont actuellement non encore optimisées), enrichir la bibliothèques d'opérateurs, stabiliser les codes et mieux les documenter.

La prochaine étape sera l'implémentation de services Web géographiques. Elle commencera par le déploiement des fonctionnalités de base de la plate-forme (algorithmes géométriques et topologiques principalement) pour aller ensuite, petit à petit, vers la mise à disposition des applications développées au laboratoire COGIT (appariement de données géographiques, mise à jour, etc).

Références

- [CASTOR 02] Castor Project : *Castor Project Home Page*, <http://castor.exolab.org>, 2002.
- [CVS 02] Concurrent Version System : *The open Standard for Version Control*, <http://www.cvshome.org>, 2002.
- [ECLIPSE 02] Eclipse Project : *Eclipse Main Page*, <http://www.eclipse.org>, 2002.
- [GEOTOOLS 02] Geotools Project : *Geotools - Open source mapping toolkit*, <http://www.geotools.org>, 2002.
- [ISO 01a] International Organization for Standardization : *Geographic Information - Rules for application schema*, ISO Draft International Standard 19109, 2001.
- [ISO 01b] International Organization for Standardization : *Geographic Information - Spatial referencing by coordinates*, ISO Draft International Standard 19111, 2001.
- [ISO 01c] International Organization for Standardization : *Geographic Information - Metadata*, ISO Draft International Standard 19115, 2001.
- [OBJECTEERING 02] Objecteering™ Software, <http://www.objecteering.com>, 2002.
- [OGC 01a] OpenGIS™ Consortium, *The OpenGIS™ Abstract Specification - Topic 1 : Feature Geometry (ISO 19107 Spatial Schema), version 5*, OGC Document Number 01-101, 2001.
- [OGC 01b] OpenGIS™ Consortium, *Web Feature Server Specification*, OGC Document Number 01-023, 2001.
- [OGC 01c] OpenGIS™ Consortium, *Web Map Service Implementation Specification*, OGC Document Number 01-068r3, 2001.
- [OMG 02] Object Management Group : *UML™ Resource Page*, <http://www.omg.org/uml>.
- [OMONDO 02] Omondo : *Eclipse - Omondo - The Live UML Company*, <http://www.omondo.com>, 2002.
- [ORACLE 02] Oracle™ Technology Network, <http://otn.oracle.com>, 2002.
- [POSTGIS 02] PostGIS™, *Geographic Objects for PostgreSQL*, <http://postgis.refractor.net>, 2002.
- [SAFE 02] Safe™ Software : *Data Translation Solutions*, <http://www.safe.com>, 2002.
- [SUN 02a] Sun™ Microsystems : *The Source for Java™ Technology*, <http://java.sun.com>, 2002.
- [SUN 02b] Sun™ Microsystems : *Java Data Objects (JDO)*, <http://java.sun.com/products/jdo/>, 2002.
- [SUN 02c] Sun™ Microsystems : *Java Native Interface (JNI)*, <http://java.sun.com/products/jdk/1.2/docs/guide/jni/>, 2002.
- [SUN 02d] Sun™ Microsystems : *Javadoc Tool Home Page*, <http://java.sun.com/j2se/javadoc/index.html>, 2002.
- [SUN 02e] Sun™ Microsystems : *Sun ONE Studio (formerly Forte[tm] Tools)*, <http://www.sun.com/software/sundev/>, 2002.
- [W3C 00a] World Wide Web Consortium : *Simple Object Access Protocol (SOAP) 1.1*, W3C Note, May 2000, <http://www.w3.org/TR/SOAP>, 2000.
- [W3C 00b] World Wide Web Consortium : *Extensible Markup Language (XML) 1.0 (Second Edition)*, W3C Recommendation, October 6, 2000, <http://www.w3.org/TR/REC-xml>, 2000.
- [W3C 01a] World Wide Web Consortium : *Web Services Description Language (WSDL) 1.1*, W3C Note, March 2001, <http://www.w3.org/TR/wsdl>, 2001.
- [W3C 01b] World Wide Web Consortium : *Scalable Vector Graphics (SVG) 1.0 Specification*, W3C Recommendation, September 2001, <http://www.w3.org/TR/SVG>, 2001.
- [W3C 02] World Wide Web Consortium : *Web Services Activity*, <http://www.w3.org/2002/ws>, 2002.

Publications

- [BARRAULT et al 01] M. Barrault, N. Regnaud, C. Duchêne, K. Haire, C. Baeijs, Y. Demazeau, P. Hardy, W. Mackaness, A. Ruas and R. Weibel : *Integrating Multi-agent, Object-oriented, And Algorithmic Techniques For Improved Automated Map Generalization*, in Proceedings of the 20th International Cartographic Conference, vol. 3, Beijing, Chine, pp. 2110-2116, laboratoire COGIT, IGN-SR 01-033-S-COM-MB, 2001.
- [DAVID 91] B. David : *Modélisation, représentation et gestion d'information géographique - Une approche en relationnel étendu*, thèse de doctorat en Informatique de l'Université Paris-6, 214 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR 91-044-S-THE-BD, soutenue le 8 juillet 1991.
- [DUCHÊNE, RUAS 01] 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, laboratoire COGIT, IGN-SR 01-048-S-ART-CD, 2001.
- [LECORDIX et al 97] F. Lecordix, C. Plazanet and J.-Ph. Lagrange : *A Platform for Research in Generalisation: Application to Caricature*, in *Geoinformatica 1:2*, Kluwer Academic Publishers, Boston (USA), pp. 161-182, laboratoire COGIT, IGN-SR 97-022-S-ART-FL, 1997.
- [RAYNAL et al 95] L. Raynal, B. David and G. Shorter : *Building an OOGIS prototype : experiments with GeO2, AutoCarto*, pp. 137-146, laboratoire COGIT, IGN-SR 95-007-S-COM-LR, 1995.
- [RUAS 98] A. Ruas : *OO-Constraint modelling to automate urban generalisation process*, in Proceedings of the 8th International Symposium on Spatial Data Handling (SDH'98), Vancouver (Canada), pp. 225-235, laboratoire COGIT, IGN-SR 98-042-S-COM-AR, 1998.

B.11 Simulation du champ de pesanteur à partir d'un modèle géologique en trois dimensions : un outil pour l'évaluation des méthodes de calcul de géoïde

Olivier Jamet & Patrick Sillard

Introduction

L'action de recherche « *Géodésie Physique : champ de pesanteur et nivellement* », ouverte en 2001, comprend deux volets principaux. L'un, concerne le calcul du champ de pesanteur, avec pour objectif l'amélioration de la qualité du géoïde national. Le second vise à l'amélioration des processus de calcul des réseaux de nivellement [JAMET, SILLARD 02]. Ce dernier thème n'a pas fait l'objet de travaux cette année.

En 2002, les recherches sur le calcul du champ de pesanteur se répartissent suivant quatre axes :

- calcul de géoïdes locaux : en collaboration avec la Faculté des Sciences de Tunis, une étude a été conduite sur le calcul de la contribution de la topographie au géoïde, dont l'objectif était l'adaptation d'un logiciel initialement développé par Galaxie Comet et David Maillard en 1994 [COMET, MAILLARD 94] au système cartographique tunisien. Ce travail a donné lieu à un rapport de DEA [ZENNED 02] ;
- étude théorique du problème du calcul de la répartition des densités à l'intérieur de la Terre en fonction de la seule connaissance du potentiel : cette étude se situe dans le prolongement des recherches sur l'incidence des modélisations statistiques sur le calcul du champ [JAMET, DIAMENT 03] et a pour objet de clarifier la nature de l'ambiguïté de la répartition des densités, afin d'en déduire de nouvelles approches pour le paramétrage de la fonction de covariance du champ utilisée pour son calcul par les méthodes de collocation. Elle a donné lieu à un rapport [JAMET 02] ;
- représentation du champ de pesanteur sur une base fonctionnelle d'ondelettes : le travail effectué dans ce domaine correspond aux réflexions préliminaires conduites dans le cadre du démarrage d'une thèse (thèse de l'Institut de Physique du Globe de Paris d'Isabelle Panet, sous la direction de Michel Diament : « Détermination des anomalies de la pesanteur à partir de données satellitaires et de données sol. Application à la structure et au comportement mécanique de la lithosphère ») ;
- poursuite des développements d'un outil de simulation du champ de pesanteur à partir d'anomalies de la densité des roches de la croûte terrestre. Ce travail a donné lieu à un rapport de stage [AZZOUT 03].

Dans cet article, nous résumons les travaux concernant ce dernier point. Dans un premier temps, nous expliquons l'intérêt du calcul de simulations du champ à partir de modèles géologiques réalistes. La section suivante présente les méthodes de calcul utilisées pour le calcul du potentiel et le logiciel développé. La dernière section est consacrée à l'avenir de ces travaux.

Objectifs des simulations

L'exactitude moyenne du géoïde actuellement disponible, calculé par Henri Duquenne (ESGT) en 1998 [DUQUENNE 98], est estimée à 3 cm (erreur moyenne quadratique après basculement du géoïde sur un ensemble de points GPS nivelés).

Les sources d'erreur identifiées sont multiples :

- l'exactitude des mesures et la densité de la couverture : la couverture gravimétrique est pauvre sur les reliefs et l'exactitude est hétérogène sur l'ensemble du territoire (incertitude des mesures anciennes) ;
- le rattachement des mesures à un système de référence : l'ancienneté des campagnes gravimétriques utilisées ne permet pas de garantir la fiabilité des positions attachées aux mesures ;
- la méthode de calcul : la mise en œuvre des calculs fait appel à un paramétrage complexe et à un certain nombre de simplifications.

Nous nous intéressons principalement à cette troisième source d'erreur. S'il est aisé de déterminer l'incertitude liée aux phases de pure approximation numérique (e.g. la limitation du domaine d'intégration dans les calculs intégraux), les incertitudes liées à la modélisation du terrain et à la modélisation statistique du champ de pesanteur sont plus délicates à évaluer. Concernant l'incidence des variations de densité à l'intérieur de la croûte terrestre, d'autres auteurs ont montré qu'elles pouvaient avoir un effet sensible. L'expérience conduite par Tziavos et ses collaborateurs [TZIAVOS et al 96] a consisté à prendre en compte, pour chaque maille du MNT utilisé dans un calcul de géoïde, la densité moyenne le long de la verticale en lieu et place d'une densité constante pour toute la zone.

Ces auteurs montrent que l'effet sur les valeurs des hauteurs géoïdales obtenues est de l'ordre de 7 mm (en écart quadratique moyen) et peut atteindre plus de 3 cm (écart maximum entre le résultat du calcul à densité constante et du calcul à densités variables).

Un modèle géologique constitué de densités fonctions uniquement de la position planimétrique n'est guère réaliste (le pendage des couches géologiques n'atteint que très rarement 90°). Pourtant, il suffit à mettre en évidence un effet centimétrique sur les valeurs du géoïde. Il nous paraît donc nécessaire, le centimètre étant l'ordre de grandeur de précision souhaité, d'évaluer, sur une géologie réaliste, les effets de la prise en compte des variations de densité sur l'exactitude des hauteurs géoïdales.

Concernant l'incidence de la modélisation statistique du champ, une partie de ses effets peut être mise en évidence sur de simples critères de cohérence. Nous avons, par exemple, montré que l'hypothèse de stationnarité locale du champ de pesanteur était incompatible avec une hypothèse de stationnarité à l'échelle de la Terre. Un champ globalement stationnaire interpolé par une méthode de krigeage souffrira toujours d'erreurs d'interpolation significatives, dès lors que le bruit de mesure est important [JAMET, DIAMENT 03] et [JAMET, SILLARD 02].

Cette démarche n'est toutefois pas suffisante. Si l'on veut, par exemple, comparer la qualité d'interpolation du champ lorsque ses covariances sont calculées sur les données à sa qualité lorsque ses covariances suivent un modèle isotrope, on est conduit à faire des hypothèses sur le champ réel. Un outil de simulation à partir d'une géologie réaliste constitue l'un des moyens d'effectuer ces hypothèses.

Ce besoin de simulation a bien été identifié par la communauté internationale. L'association internationale de géodésie a en effet créé un groupe d'étude dédié à cette activité (IAG Special Study Group 3.177 : "Synthetic modeling of the earth's gravity field"), et de nombreux travaux sont publiés sur le sujet. Ces travaux peuvent être classés en deux types d'approche. La première procède par simulation de coefficients d'harmoniques sphériques ou ellipsoïdales (par exemple : [WERNER 97] [HAAGMANS 00] [SANSÓ, SONA 00]).

Cette approche est évidemment plus particulièrement adaptée aux études globales (l'expression des courtes longueurs d'onde nécessaires localement conduirait à un nombre extrêmement élevé de coefficients). La seconde approche utilise des expressions analytiques de la pesanteur générées par des corps de densité constante et de forme géométrique connue.

De telles expressions ont été largement publiées, tant pour des formes simples comme le parallélépipède rectangle [NAGY et al 00], que pour des formes complexes polyédrales : [OKABE 79], pour l'accélération [GÖTZE 76] pour l'accélération et sa dérivée et [PETROVIĆ 96] pour le potentiel et ses deux premières dérivées.

Notre travail s'appuie sur cette seconde approche.

Calcul du champ sur un volume quelconque

Dans cette section, nous exposons le principe du calcul du champ de gravité généré par un corps polyédral quelconque. Nous avons utilisé la même démarche que S. Petrović [PETROVIĆ 96] pour la transformation de l'intégrale de volume en intégrale de surface. Notre approche diffère ensuite de la sienne : nous avons préféré conduire le calcul dans des repères locaux, de façon à conserver des expressions cartésiennes qui permettent d'accéder facilement à toutes les dérivées.

L'expression de la pesanteur s'en déduit par simple addition de l'effet de la force centrifuge, dont l'expression est connue. Nous limitons l'exposé à l'expression du potentiel de gravité. Le calcul de ses dérivées procède de la dérivation des formules obtenues par rapport à la position du point où est calculé le potentiel.

Principe général

Le potentiel de gravité généré par un volume V fermé de densité constante en un point P s'écrit :

$$U(P) = G\rho \iiint_V \frac{1}{l} dv \quad (1)$$

où l désigne la distance du point P à un point quelconque de V et dv l'élément de volume.

Son calcul analytique pour un volume polyédral repose sur le théorème de Gauss :

$$\iiint_V \nabla \cdot \vec{u} \, dv = \iint_S \vec{u} \cdot \vec{n} \, ds \quad (2)$$

où ∇ désigne l'opérateur de divergence, S la surface du volume V (ds l'élément de surface) et \vec{n} , la normale sortante à cette surface.

En considérant que :

$$\frac{1}{l} = \frac{1}{2} \nabla^2 l = \frac{1}{2} \nabla \cdot (\nabla l) \quad (3)$$

où $\nabla^2 l$ désigne le laplacien de l et ∇l son gradient (dérivée par rapport à la position du point du volume V), il vient :

$$U(P) = \frac{1}{2} G\rho \iint_S \nabla l \cdot \vec{n} \, ds \quad (4)$$

Sur un volume polyédral composé de m facettes S_i , $i = 1..m$, on peut donc calculer le potentiel comme la somme des contributions de chaque facette :

$$U(P) = \frac{1}{2} G\rho \sum_{i=1}^m \left(\iint_{S_i} \nabla l \cdot \vec{n}_i \, ds \right) \quad (5)$$

où \vec{n}_i désigne la normale à la facette S_i , constante sur celle-ci.

Formulation approchée

Expression de l'effet d'une facette

En utilisant :

$$\nabla_M l \equiv \nabla_M PM = \frac{\vec{PM}}{PM} \quad (6)$$

l'expression (5) donne immédiatement :

$$U(P) = \frac{1}{2} G\rho \sum_{i=1}^m \left(\iint_{S_i} \frac{\vec{PM}}{PM} \cdot \vec{n}_i \, ds \right) = \frac{1}{2} G\rho \sum_{i=1}^m \left(\iint_{S_i} \cos(\theta_i^{(M)}) \, ds \right) \quad (7)$$

où $\theta_i^{(M)}$ désigne l'angle formé par le vecteur \vec{PM} et par la normale \vec{n}_i à la face i .

En désignant par s_i la surface de la face i , par $M_i^{(0)}$ son centre de gravité et par $\theta_i^{(0)}$ l'angle $\theta_i^{(M_i^{(0)})}$, on a donc une expression approchée de la valeur de la contribution de la face i au potentiel :

$$U(P) \approx \frac{1}{2} G\rho \sum_{i=1}^m s_i \cos(\theta_i^{(0)}) \quad (8)$$

Algorithme de calcul approché

Cette formule est intéressante pour deux raisons. D'une part, elle est d'expression analytique très simple, ce qui permet un calcul sur un grand nombre de facettes à un coût faible. D'autre part, et c'est son principal intérêt, son exactitude peut être majorée.

Considérons en effet la contribution de la face i :

$$U_i(P) = \frac{1}{2} G\rho \iint_{M \in S_i} \cos(\theta_i^{(M)}) \quad (9)$$

dont la valeur approchée proposée est :

$$\tilde{U}_i(P) = \frac{1}{2} G\rho s_i \cos(\theta_i^{(0)}) \quad (10)$$

Nous nous plaçons dans le cas d'une face triangulaire (toute face plane peut être décomposée en triangles) et dans le cas où le point P est situé au dessous de la face considérée (le raisonnement est symétrique lorsque le point est au dessus). Nous notons $M_i^{(1)}$, $M_i^{(2)}$ et $M_i^{(3)}$, les trois sommets du triangle.

L'angle $\theta_i^{(M)}$ est alors compris entre 0 et $\pi/2$ pour tous les points M de la face et la fonction $\cos(\theta_i^{(M)})$ est une fonction convexe du point M sur le domaine d'intégration.

La valeur de l'intégrale utilisée dans l'équation (9) est alors minorée par l'intégrale de la fonction linéaire définie sur la face et passant par les ordonnées $\cos(\theta_i^{(M_i^{(k)})}) \equiv \cos(\theta_i^{(k)})$ ($k = 1..3$), valeurs de la fonction cosinus aux sommets du triangle (voir figure B.11.1).

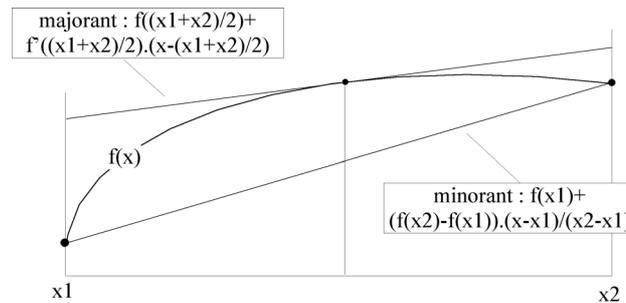


figure B.11.1

Fonctions linéaires majorant et minorant une fonction convexe (exemple à une dimension).

Par ailleurs, l'expression (10) n'est autre qu'un majorant de l'expression (9). En effet, on peut majorer l'intégrale de l'équation (9) en calculant l'intégrale de la fonction linéaire tangente à la fonction cosinus au point $M_i^{(0)}$ (voir figure B.11.1), d'expression :

$$\cos(\theta_i^{(0)}) + \iint_{M \in S_i} [\nabla_M \cos](\theta_i^{(0)}) \overrightarrow{M_i^{(0)} M} ds \quad (11)$$

or :

$$\iint_{M \in S_i} [\nabla_M \cos](\theta_i^{(0)}) \overrightarrow{M_i^{(0)} M} ds = [\nabla_M \cos](\theta_i^{(0)}) \iint_{M \in S_i} \overrightarrow{M_i^{(0)} M} ds = 0 \quad (12)$$

On a donc :

$$\frac{1}{6} G \rho s_i \sum_{k=1}^3 \cos(\theta_i^{(k)}) \leq U(P) \leq \tilde{U}(P) \quad (13)$$

Dans le cas où le point P est au dessus de la face, l'inégalité (13) est simplement renversée.

Les expressions qui précèdent permettent de calculer le potentiel à une exactitude e arbitraire.

On peut, en effet, garantir l'exactitude des formules approchées en imposant que la contribution de chaque face soit d'exactitude e/m , et en calculant la contribution de chaque face à cette exactitude par l'algorithme récursif suivant.

Calculer la contribution d'une facette à l'exactitude e'

- si l'exactitude calculée par l'expression (13) est meilleure que e' , retourner la contribution de la facette donnée par l'expression (10) ;
- sinon, diviser la facette en deux et calculer sa contribution à l'exactitude $e'/2$.

La convergence de cet algorithme se démontre aisément en remarquant que l'exactitude de $\tilde{U}(P)$ est majorée par :

$$\frac{1}{2} G \rho s_i \max_{k=1..3} \left[\left| \cos(\theta_i^{(k)}) - \cos(\theta_i^{(0)}) \right| \right] \quad (14)$$

qui décroît plus vite que 2^{-n} avec le nombre n de divisions.

Évaluation de la méthode

Les formules précédentes ont été testées sur le parallélépipède rectangle, dont le potentiel est connu [NAGY et al 00]. Elles donnent des résultats numériques satisfaisants, mais conduisent à un beaucoup trop grand nombre de divisions de faces lorsque le point P est proche de l'objet pour être opératoires. La méthode de calcul récursif a donc été abandonnée, au profit d'une méthode de calcul fondée sur des expressions obtenues par calcul de l'intégrale (9).

Formulation exacte

Principe du calcul

L'intégrale (9) admet une expression analytique dans le cas d'une face quelconque. Considérons le point P' , projeté du point P sur le plan de la face i (figure B.11.2, page suivante). Nous nous replaçons dans le cas d'une face quelconque, définie par n sommets $M_i^{(k)}$, $k = 1..n$, ordonnés le long de son périmètre.

L'intégrale (9) sur le périmètre ($M_i^{(1)}, M_i^{(2)}, \dots, M_i^{(n)}$) peut alors se calculer comme la somme des contributions des n triangles ($P', M_i^{(k)}, M_i^{(k+1)}$) (avec $M_i^{(n+1)} \equiv M_i^{(1)}$) :

$$\iint_{M \in S_i} \cos(\theta_i^{(M)}) ds = \sum_{k=1}^n \iint_{M \in (P, M_i^{(k)}, M_i^{(k+1)})} \cos(\theta_i^{(M)}) ds \equiv \sum_{k=1}^n I_k \quad (15)$$

où les contributions des différentes arêtes sont comptées positivement ou négativement, selon que le point P est situé au dessus ou au dessous du triangle ($P', M_i^{(k)}, M_i^{(k+1)}$) (le dessus d'une face étant défini par l'orientation de sa normale).

L'expression (15) fait donc apparaître dans le calcul les contributions au potentiel I_k de chacune des arêtes, dont on peut avoir une expression analytique par intégration, moyennant un choix judicieux du repère de coordonnées.

Expression de l'effet d'une arête

Pour calculer les intégrales apparaissant dans l'expression (15), on se place, pour chaque arête k dans le repère illustré par la figure B.11.2.

Dans un tel repère, on a :

$$\cos(\theta_i^{(M)}) = \frac{-z_p}{\sqrt{r^2 + z_p^2}} \quad (16)$$

et :

$$I_k \equiv \iint_{M \in (P, M_i^{(k)}, M_i^{(k+1)})} \cos(\theta_i^{(M)}) ds = - \int_{\alpha=\alpha_1}^{\alpha_2} d \cos(\alpha) \int_{r=0}^{\frac{z_p r}{\sqrt{r^2 + z_p^2}}} dr \quad (17)$$

Il vient :

$$I_k = \left[\alpha \cdot z_p \cdot |z_p| - z_p^2 \arcsin\left(\frac{z_p \sin(\alpha)}{\sqrt{d^2 + z_p^2}}\right) - d \cdot z_p \operatorname{arctanh}\left(\frac{d \tan(\alpha)}{\sqrt{\frac{d^2}{\cos^2(\alpha)} + z_p^2}}\right) \right]_{\alpha_k}^{\alpha_{k+1}} \quad (18)$$

Cette expression peut s'exprimer en coordonnées cartésiennes dans le repère associé au repère de coordonnées polaires utilisé (figure B.11.2) :

Il vient :

$$I_k = \left[z_p \cdot |z_p| \arctan\left(\frac{y}{x}\right) - z_p^2 \arctan\left(\frac{y \cdot z_p}{x \sqrt{x^2 + y^2 + z_p^2}}\right) - x \cdot z_p \operatorname{arctanh}\left(\frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2 + z_p^2}}\right) \right]_{y_k}^{y_{k+1}} \quad (19)$$

et permet de calculer les composantes du champ de gravité et du tenseur gradiométrique par simple dérivation suivant x , y , et z_p .

Notons que cette expression fait apparaître des termes divergents pour des valeurs particulières de x et de z_p : on vérifie aisément que les limites de I_k sont définies dans tous les cas, et il suffit d'en tenir compte lors de la programmation pour éviter tout dépassement numérique.

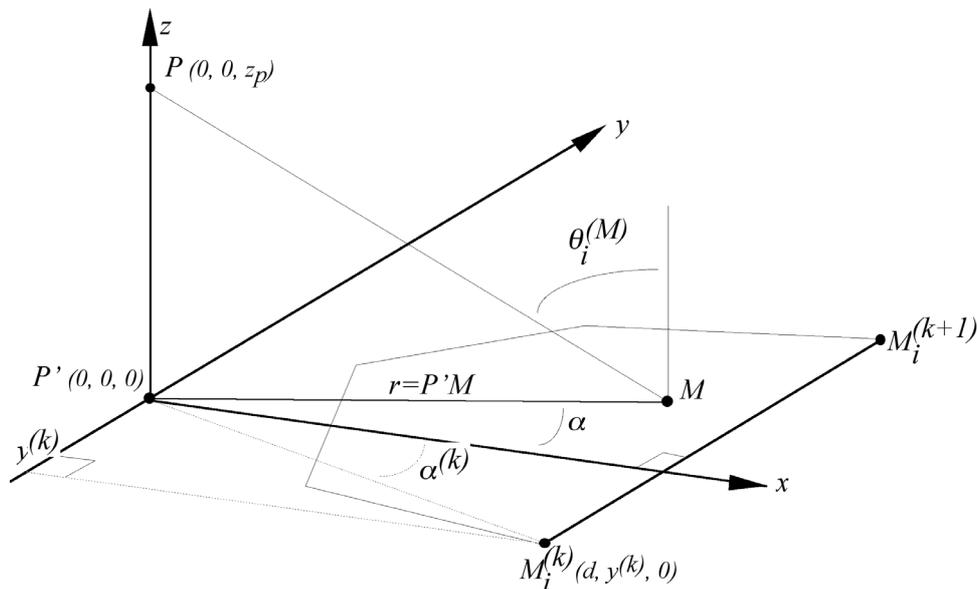


figure B.11.2

Repères cartésien et polaire d'une arête du contour d'une face.

Calcul de l'effet d'une facette

L'effet d'une facette se calcule alors par simple sommation des contributions de chacune des arêtes (équation (15)), en rapportant chaque fois ces contributions dans un repère lié à la face (pour l'accélération et le tenseur gradiométrique).

Formulation mixte

Les expressions théoriques calculées dans la section précédente permettent un calcul direct du potentiel généré par un volume polyédral, par simple parcours de ses arêtes sur chacune de ses faces. Cependant, leur précision numérique se dégrade lorsque le point P s'éloigne du volume considéré.

En effet, la contribution de chaque face fera intervenir la sommation de quantité d'ordre de grandeur élevé devant la valeur finale de la somme (la contribution d'une arête est en fait la contribution d'un triangle, dont la surface croît avec l'éloignement de la projection P' de P du centre de la face).

Pour pallier ce problème, nous avons implanté une formulation mixte. Pour calculer le potentiel à une exactitude ϵ donnée, on teste en premier lieu si la formulation approchée (10) de la contribution de la facette a une exactitude meilleure que $\frac{\epsilon}{m}$, et l'on n'utilise la formulation exacte (19) que dans le cas contraire.

Validation des expressions et implantation

Les expressions qui précèdent ont été validées, d'une part, par comparaison à des expressions publiées, en particulier aux formules données par Nagy et ses collaborateurs pour le prisme rectangle [NAGY et al 00]. D'autre part, dans la mesure des capacités de calcul disponibles, nous avons confronté les résultats du calcul par sommation des contributions des arêtes à une intégration numérique volumique de la formule de Newton : les deux calculs donnent des résultats identiques à l'exactitude de l'intégration numérique près.

Elles ont servi de base à une implantation assurant les fonctionnalités suivantes :

- lecture des modèles géologiques définis dans un repère cartographique au format VRML97 ("Virtual Reality Modeling Language", langage de modélisation de réalité virtuelle : standard international ISO/IEC 14772), choisi d'une part parce qu'il constitue l'un des standards d'échange de données 3-D, et d'autre part, parce qu'il nous permettait de générer nos propres modèles géologiques à partir de logiciels de conceptions 3-D en distribution libre ;
- changements de coordonnées permettant le passage d'une projection cartographique à un repère euclidien local (pour la nécessité des calculs) ;
- calcul du potentiel et de l'accélération sur un ensemble de points spécifiés dans un repère cartographique par l'utilisateur.

Ces développements ont été principalement conduits par Yassine Azzout, dans le cadre d'un stage d'ingénieur de l'École Supérieure d'Ingénierie Léonard de Vinci [AZZOUT 03].

Prospectives

Évaluation de méthodes de calcul de géoïde

Le logiciel de simulation de la gravité pourra servir de base à deux types d'étude. D'une part, l'évaluation de l'exactitude des méthodes de calcul de géoïde. Le principe de telles études est simple. Le calcul de la gravité à partir d'un modèle du sous-sol permet à la fois de calculer un géoïde théorique (le géoïde correspondant au champ synthétique généré) et de simuler des mesures (par simple adjonction d'un bruit de mesure aux valeurs de la gravité). Le résultat d'un calcul de géoïde sur les mesures pourra ainsi être confronté à une référence (le géoïde théorique) pour quantifier les effets de méthode. Nous nous intéresserons en particulier, dans le cadre des méthodes de collocation, à l'incidence sur les résultats du choix des covariances du champ et de la méthode de régularisation utilisée. Outre ces évaluations relatives des différentes approches, de telles expériences devraient également permettre d'évaluer dans quelle mesure la production d'un géoïde centimétrique est possible.

D'autre part, la disponibilité d'un champ synthétique et de la topographie sur une zone de taille raisonnable devrait permettre également de simuler des mesures de nivellement, et d'avancer dans la modélisation des erreurs et l'amélioration des méthodes de compensation de réseau, dans la suite des travaux de Patrick Sillard [JAMET, SILLARD 02].

Développements à venir

Le logiciel existant est adapté au calcul du champ de gravité généré par les roches de la croûte terrestre. Il est d'ores et déjà utilisable pour l'étude de l'interpolation des courtes longueurs d'onde du champ. Son utilisation pour des simulations réalistes dans le cadre des études évoquées plus haut sera possible moyennant quelques améliorations, que nous envisageons pour l'année à venir.

La première concerne l'intégration des grandes longueurs d'onde. Il est a priori hors de question de simuler les grandes longueurs d'onde du champ par le même type de méthode (qui demanderait un modèle 3-D de la Terre entière). Les grandes longueurs d'onde doivent provenir de modèles du champ global, tels que les développements en harmoniques sphériques issus de l'orbitographie des satellites et des missions de gravimétrie spatiale en cours.

La combinaison du champ généré par la géologie locale et du champ mondial ne peut toutefois pas se faire sans précaution : ces deux champs sont à spectres recouvrants. Il convient donc, avant d'intégrer le champ mondial au champ simulé, d'en retirer la part provenant du modèle géologique, et pour ce faire, de calculer les composantes du champ provenant de la géologie sur la base des harmoniques sphériques. Ce calcul pourra s'appuyer sur les travaux de R.A. Werner [WERNER 97].

La seconde concerne le calcul de la pesanteur. Il s'agit simplement d'ajouter au potentiel de gravité le potentiel centrifuge lié à la rotation de la Terre. Cette étape relève uniquement d'un développement logiciel.

Enfin, le logiciel pourra intégrer des outils de simulation des mesures plus élaborés que le simple ajout d'un bruit indépendant aux valeurs théoriques, en particulier pour la simulation des campagnes de gravimétrie aérienne, qui présentent un intérêt majeur pour la densification des mesures gravimétriques à moindre coût.

À plus long terme, en particulier dans le cadre des études concernant le nivellement, il sera possible de prendre en compte les variations temporelles du champ en intégrant au calcul des modèles de marées.

Collaborations

Ce travail est effectué en collaboration avec Michel Diament, du laboratoire de Gravimétrie et de Géodynamique (UMR 7096) de l'Institut de Physique du Globe de Paris. Des contacts ont été pris avec le projet « Méthodes géophysiques au service de la cartographie numérique et 3-D » du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), qui pourrait fournir au laboratoire LAREG des jeux de données géologiques tridimensionnelles sur des zones de taille raisonnable (100 km x 100 km) dans un cadre de coopération qui reste à définir.

Références

- [DUQUENNE 98] H. Duquenne : *QFG98, A new solution for the quasigeoid in France*, (http://www.esgt.cnam.fr/recherche/geoide/art_buda.pdf), 1998.
- [GÖTZE 76] H.J. Götze : *Ein numerisches Verfahren zur Berechnung der gravimetrischen Feldgrößen für dreidimensionale Modelkörper*, thèse de l'Université de Clausthal, 1976.
- [HAAGMANS 00] R. Haagmans : *A synthetic Earth for use in geodesy*, in *Journal of Geodesy*, vol. 74, pp. 503-511, 2000.
- [PETROVIĆ 96] S. Petrović : *Determination of the potential of homogeneous polyhedral bodies using line integrals*, in *Journal of Geodesy*, vol. 71, n. 1, pp. 44-52, 1996
- [NAGY et al 00] D. Nagy, G. Papp and J. Benedek : *The gravitational potential and its derivatives for the prism*, in *Journal of Geodesy*, vol. 74 n°7-8, pp. 552-560, 2000.
- [OKABE 79] M. Okabe : *Analytical expressions for gravity anomalies due to homogeneous polyhedral bodies and translations into magnetic anomalies*, in *Geophysics*, vol. 44, n°4, pp. 730-741, 1979.
- [SANSÓ, SONA 00] F. Sansó and G. Sona : *ELGRAM : an ellipsoidal gravity potential manipulator*, IAG International symposium on Gravity, Geoid and Geodynamics, 31 juillet-4 août, Banff (Alberta, USA), 2000.
- [TZIAVOS et al 96] I.N. Tziavos, M.G. Sideris and H. Sünkel : *The effect of surface density variations on terrain modeling - A case study in Austria*, in *Actes de la Session G7 de la XXIème assemblée générale de la Société Géophysique Européenne*, vol. 96:2, Institut de Géodesie Finlandais. pp. 99-110, 1996.
- [WERNER 97] R.A. Werner : *Spherical harmonic coefficients for the potential of a constant-density polyhedron*, in *Computers and Geosciences*, vol. 23, n° 10, pp. 1071-1077, 1997.
- [ZENNED 02] Olfa Zenned : *Calcul d'un Géoïde sur le nord de la Tunisie (titre provisoire)*, rapport de fin d'étude du DEA de Géologie, Faculté des Sciences de Tunis, décembre 2002.

Publications

- [AZZOUT 03] Yassine Azzout : *Représentation tridimensionnelle du sous-sol appliquée à la simulation de la gravité*, rapport de stage de fin de 1ère année de l'École Supérieure d'Ingénierie Léonard de Vinci, janvier 2003.
- [COMET, MAILLARD 94] Galaxie Comet & David Maillard : *Détermination d'un géoïde local par utilisation d'un MNT*, rapport de TFE ESGT, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 1994
- [JAMET 02] O. Jamet : *Inversion des densités à l'intérieur du volume des sources sur un critère de minimisation d'énergie ; éléments de théorie*, rapport de recherche n. R5, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, juin 2002
- [JAMET, DIAMENT 03] Olivier Jamet and Michel Diament : *On the estimation of local spectral representations of gravity anomalies*, in *Cahier du Centre européen de géodynamique et de séismologie (à paraître)*, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 2003.
- [JAMET, SILLARD 02] O. Jamet & P. Sillard : *Géodésie Physique*, in *Bulletin d'information de l'IGN n° 73*, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 2002.

B.12 Combinaison de séries temporelles des positions des stations et des paramètres de rotation de la Terre

Zuheir Altamimi

Introduction

Un des objectifs du service international de la rotation terrestre (IERS) est la cohérence entre les repères terrestre ITRF et céleste ICRF et la rotation de la Terre qui lie ces deux repères. Actuellement, les trois produits sont calculés séparément et leur cohérence est assurée *a posteriori*. Afin de mieux assurer cette cohérence, il faut théoriquement combiner simultanément les trois composantes. Le logiciel CATREF, développé au laboratoire LAREG pour le calcul de l'ITRF, a été récemment étendu pour inclure les paramètres de rotation de la Terre.

CATREF est aussi adapté aux combinaisons simultanées de repères de référence terrestres (TRF) et paramètres rotation de la Terre (ERP), sous forme de séries temporelles : positions des stations hebdomadaires ou mensuelles, coordonnées journalières du pôle et temps universel. Nous présentons ici, les résultats de quelques tests de combinaisons TRF et ERP, en utilisant des solutions, en séries temporelles, fournies par diverses centres d'analyse des quatre techniques principales : VLBI, SLR, GPS et DORIS. Nous passerons en revue les différents facteurs influant sur les résultats, et en particulier, la répartition des stations des différents réseaux et la qualité de sites de co-localisation. Ces tests montrent la prédominance des solutions GPS, principalement due au réseau des stations permanentes GPS de l'IGS (International GPS Service), observant en continue.

Modèle de combinaison

Le modèle de combinaison initialement implémenté dans le logiciel CATREF pour le calcul de l'ITRF est donné par l'équation suivante, en supposant que pour chaque solution individuelle s , et un point i , on a un vecteur position :

X_s^i à l'époque t_s^i et un vecteur vitesse \dot{X}_s^i , exprimés dans un repère k :

$$\begin{cases} X_s^i = X_c^i + (t_s^i - t_0) + T_k + D_k X_c^i + R_k X_c^i \\ \quad + (t_s^i - t_k) [\dot{T}_k + \dot{D}_k X_c^i + \dot{R}_k X_c^i] \\ \dot{X}_s^i = \dot{X}_c^i + \dot{T}_k + \dot{D}_k X_c^i + \dot{R}_k X_c^i \end{cases}$$

où, pour chaque solution individuelle s et un repère de référence k , T_k , D_k et R_k sont respectivement la translation, le facteur d'échelle et la matrice de rotation entre le repère k et le repère combiné c . Les paramètres pointés représentent les dérivées par rapport au temps. Le modèle de combinaison étendu aux paramètres de rotation de la Terre x^p , y^p au temps universel UT et leurs dérivées journalières ainsi que la durée du jour LOD incluent les équations suivantes :

$$\begin{cases} x_s^p = x^p + R2_k \\ y_s^p = y^p + R1_k \\ UT_s = UT - \frac{1}{f} R3_k \\ \dot{x}_s^p = \dot{x}^p + \dot{R}2_k \\ \dot{y}_s^p = \dot{y}^p + \dot{R}1_k \\ LOD_s = LOD + \frac{\Lambda}{f} \dot{R}3_k \end{cases}$$

où $f = 1,002737909350795$ est le facteur de conversion du temps universel UT en temps sidéral.

Λ est homogène à une variation du temps et est égale à 1 en unité temps. Le lien entre, d'une part, les coordonnées du pôle et le temps universel, et d'autre part, le repère de référence se fait à travers les trois angles de rotation $R1$, $R2$, $R3$ et leur dérivées par rapport au temps.

Quelques tests de combinaison

Quelques tests d'analyse ont été conduits, en utilisant des séries temporelles de positions de stations et des paramètres de rotation de la Terre, à partir de résultats de différents centres d'analyse participant aux activités du service international de la rotation terrestre (IERS), fournis dans le format SINEX.

À titre d'exemple, nous présentons ici des résultats préliminaires d'une combinaison multi-technique incluant les solutions suivantes, obtenues en traitant des observations sur quatre années (1999-2003) :

- SLR : solutions mensuelles du "Center for Space Research" de l'Université du Texas ;
- GPS : solutions hebdomadaires combinées de l'IGS ;
- VLBI : solutions journalières par vingt-quatre heures du "Goddard Space Flight Center" de la NASA ;
- DORIS : solutions mensuelles IGN.

Ces solutions comprennent les positions des stations de chaque technique, moyennées sur la semaine (ou le mois) ainsi que les coordonnées journalières du pôle et éventuellement leur variations temporelles, le temps universel UT et la durée du jour LOD.

La stratégie d'analyse adoptée consiste en les étapes suivantes :

- application des contraintes minimales aux solutions en réseau libre ;
- les solutions avec contraintes minimales sont utilisées telles quelles ;
- combinaisons par technique (TRF+ERP), exprimées dans l'ITRF2000 ;
- combinaison des combinaisons par technique en incluant les rattachements dans les sites de co-localisation ;
- estimation des composantes de la variance et réitération.

La combinaison de repères terrestres et des paramètres de rotation de la Terre est très sensible au nombre, qualité et répartition des sites co-localisés (sites ayant deux ou plusieurs instruments de mesure et dont les rattachements locaux tridimensionnels sont connus). L'état des sites co-localisés opérationnels à l'heure actuelle est très inhomogène quant à la répartition, nombre et qualité.

La situation actuelle de ces sites peut être résumée de la manière suivante :

- les réseaux des stations VLBI et SLR (une trentaine pour chacune des deux techniques) en activité sont très mal répartis ;
- les sous-réseaux VLBI observant dans les sessions de vingt-quatre heures sont très épars et mal adaptés à l'analyse de combinaisons en séries temporelles du fait du nombre assez réduit des co-localisations VLBI avec les autres techniques ;
- le nombre actuel des co-localisations VLBI SLR n'excède pas six ;
- pratiquement toutes les stations VLBI sont co-localisées avec des stations GPS ;
- il y a six stations SLR non co-localisées avec GPS ;
- il y a seulement huit co-localisations VLBI DORIS et sept VLBI DORIS avec une répartition inhomogène ;
- Il y a une trentaine de co-localisations GPS DORIS avec une assez bonne répartition sur la surface du globe.

Les rattachements des stations dans les sites de co-localisation disponibles actuellement concernent approximativement une soixantaine de sites ayant deux ou trois techniques. Ces rattachements ont été introduits avec une certaine pondération dans la combinaison incluant les solutions décrites plus haut.

Afin d'illustrer le niveau d'accord entre les différentes techniques (au travers des solutions sélectionnées) en termes d'estimation des paramètres de rotation de la Terre, le tableau B.12.1, ci-dessous, liste les valeurs des erreurs moyennes quadratiques pondérées par technique et par paramètre. De plus, la figure B.12.1 montre les résidus après compensation issus de cette combinaison.

tableau B.12.1 : erreur moyenne quadratique pondérée par technique et par paramètre

Technique	Xpole mas	Ypole mas	Dérivée Xpole mas/j	Dérivée Ypole Mas/j	UT ms	LOD Ms/jour
VLBI	0,18	0,15	0,33	0,34	0,02	0,02
SLR	0,13	0,12	-	-	-	-
GPS	0,04	0,04	0,07	0,08	-	0,02
DORIS	1,87	1,34	6,12	6,35	-	10,

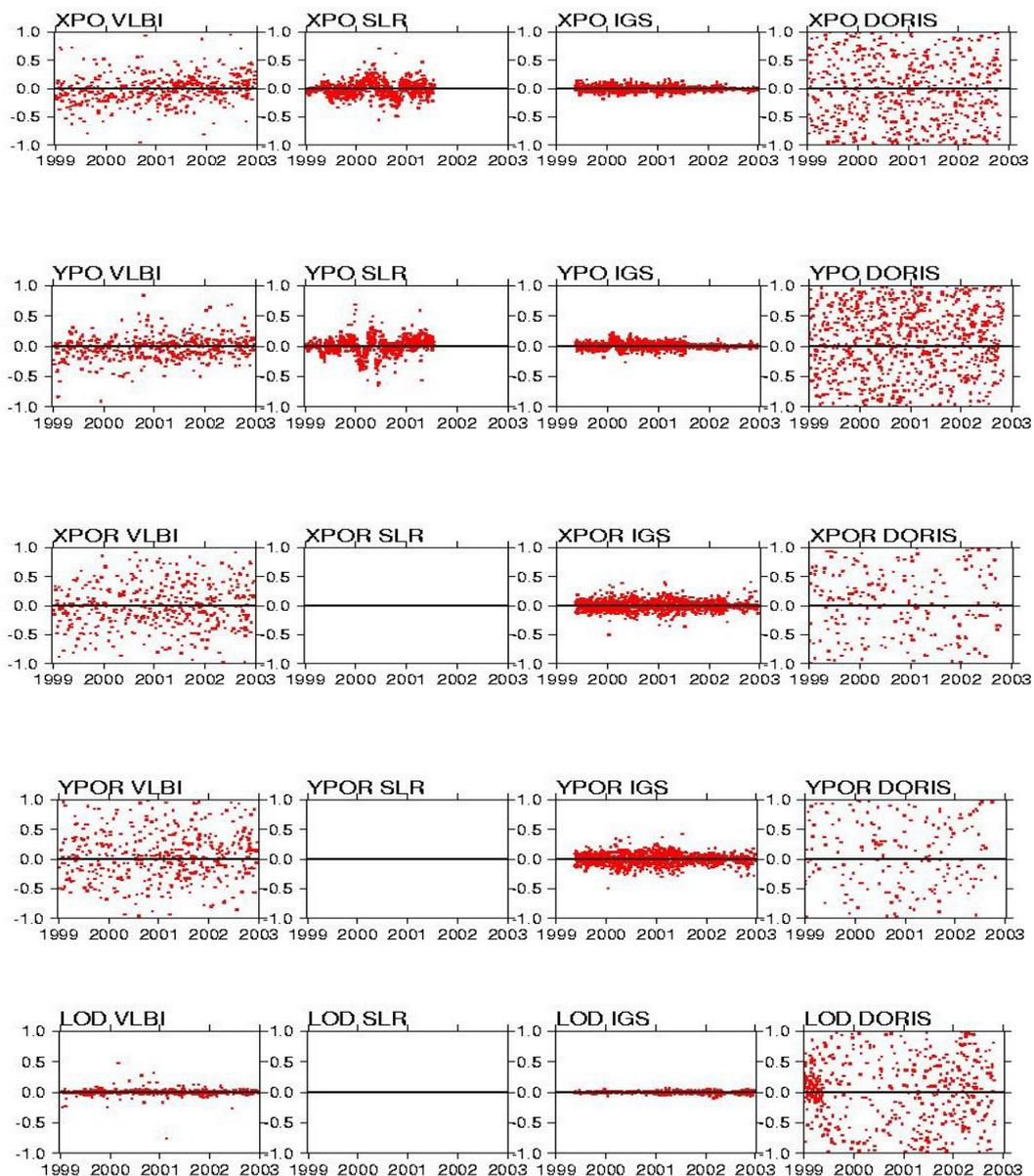


figure B.12.1 : résidus sur les coordonnées du pôle, leur dérivées et la durée du jour LOD

Conclusion

La combinaison simultanée des positions des stations et des paramètres de rotation de la Terre est un outil approprié permettant la cohérence entre le repère terrestre et les paramètres de rotation terrestre. Les sites de co-localisation entre les différentes techniques représentent un élément clé dans la combinaison. La qualité, nombre et répartition de ces sites ne sont pas optimales à l'heure actuelle.

Au regard des résultats de la combinaison présentée dans cet article, on remarque notamment que la solution GPS/IGS domine toutes les autres. Un des éléments qu'il faut noter cependant est que la solution GPS/IGS est une combinaison de sept solutions individuelles, alors que les autres sont des solutions individuelles. Enfin, un autre élément important à noter également est le fait que, contrairement aux autres techniques, le réseau GPS/IGS est constitué de plus de deux cents stations observant en continue vingt-quatre sur vingt-quatre et sept jours sur sept.

La liste suivante présente les références des publications issues du programme de recherche 2002. Elle reprend les références données dans les différents articles du Bulletin. Vous pouvez vous 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 MANDE CEDEX

téléphone (33) 01 43 98 83 19
télécopie (33) 01 43 98 81 71

adresse électronique : isabelle.melot@ign.fr

<http://recherche.ign.fr/doc/index.html>

Thèses de doctorat

[BOLDO 02] Didier Boldo : *Réalisation d'un MNE et d'ortho-images à partir d'images aériennes pour la visualisation perspective de scènes urbaines*, thèse de doctorat de l'Université René Descartes, Paris-5, directeurs de thèse : G. Stamon & H. Le Men, laboratoire MATIS, IGN/SR-02-003/C-THE-DB, soutenue le 14 juin 2002.

[BONIN 02] Olivier Bonin : *Sensibilité des applications géographiques aux incertitudes de données : lien avec le qualité*, thèse de doctorat de l'Université Paris-6, spécialité : Statistique, directeur de thèse : Daniel Pierre/Loti-Viaud, IGN, Direction Technique, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, IGN/SR-02-005/S-THE-OB, soutenue le 1er mars 2002.

[BUCHER 02] Bénédicte Bucher : *L'aide à l'accès à l'information géographique : un environnement de conception coopérative d'utilisation de données géographiques*, thèse de doctorat de l'Université Paris-6, spécialité : Informatique, directeur de thèse : François Bouillé, laboratoire COGIT, IGN/SR-02-004/S-THE-BB, soutenue le 25 juin 2002.

[DROT 02] Sébastien Drot : *Segmentation en milieu rural à partir d'images aériennes par des techniques de géométrie propabiliste*, thèse de doctorat, directeur de thèse : Josiane Zérubia, laboratoire MATIS, IGN/SR-02-006/C-THE/SD, soutenue en décembre 2002.

[JIBRINI 02] Hassan Jibrini : *Reconstruction de modèles de bâtiments à partir de données cadastrales vectorisées et d'un couple d'images aériennes à haute résolution*, thèse de doctorat de l'École Nationale Supérieure des Télécommunications, directeur de thèse : Henri Maître, laboratoire MATIS, IGN/SR-02-005/C-THE-HJ, soutenue le 29 avril 2002.

[MARCHADIER 02] Jocelyn Marchadier : *Modélisation fonctionnelle et topologique pour la vision par ordinateur, application au relèvement de cliché urbain*, thèse de doctorat, directeur de thèse : Didier Arquès, laboratoire MATIS, IGN/SR-02-007/C-THE-JM, soutenue en avril 2002.

[NOCQUET 02] Jean-Mathieu Nocquet : *Mesure de la déformation crustale en Europe occidentale par géodésie spatiale*, spécialité : Géophysique, directeur de thèse : Jean Virieux, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, soutenue le 24 juin 2002.

Rapports de mi-thèse (doctorat)

[BARD 02] S. Bard : *L'évaluation qualité des données géographiques après une généralisation cartographique*, rapport de mi-thèse, Université Paris-6, laboratoire COGIT, IGN/SR-02-042/S-RAP-SB, 2002.

[DUCHÊNE 02] C. Duchêne : *Coordination multi-agents pour la généralisation cartographique*, rapport de mi-thèse, Université Paris-6, laboratoire COGIT, IGN/SR-02-043/S-RAP-CD, 2002.

Articles (journaux scientifiques)

[ALTAMIMI et al 02] Z. Altamimi, C. Boucher and P. Sillard : *New Trends for the Realization of the International Terrestrial Reference System*, in *Adv. Space Res.*, 30 (2), 175-184, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 2002.

[ALTAMIMI et al 02] Z. Altamimi, P. Sillard and C. Boucher : *ITRF2000 : A New Release of the International Terrestrial Reference Frame for Earth*, in *Science Applications, J. Geophys. Res.*, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 2002.

[ALTAMIMI et al 02] Z. Altamimi, P. Sillard and C. Boucher : *The Impact of a No-Net-Rotation Condition on ITRF2000*, in *Geophys. Res. Lett.*, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 2002.

[BEL HADJ ALI 02] A. Bel Hadj Ali : *Using moments for representing polygons and assessing their shape quality in GIS*, in *Journal of Geographical Systems*, laboratoire COGIT, IGN/SR-02-003/S-ART-ABHA, 2002.

[BOFFET 02] A. Boffet : *Analyse multi-niveaux des espaces urbains*, in *Revue internationale de Géomatique*, vol. 12N, 2-2002, pp. 215-260, laboratoire COGIT, IGN/SR-02-018/S-ART-AB, 2002.

[BONIN 02] O. Bonin : *Large Deviation Theorems for weighted Sums applied to a Geographical Problem*, in *Journal of Applied Probability*, 39, 1-10, laboratoire COGIT, IGN/SR-02-016/S-ART-OB, 2002.

[CALAIS et al 02] 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 and C. Vigny : *REGAL : un réseau GPS permanent dans les Alpes occidentales et leur avant-pays, premiers résultats*, in *Bulletin de la Société Géologique de France*, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 2002.

[DE JOINVILLE et al 02] O. de Joinville, B. Ferrand & M. Roux : *Levé Laser aéroporté : état de l'art, évaluation, traitement des données et comparaison avec des systèmes imageur*, in *Bulletin de la SFPT n°166*, mai 2002, laboratoire MATIS, IGN/SR-02-009/C-ART-ODJ, 2002.

[DEHANT et al 02] V. Dehant, M. Feissel-Vernier, O. De Viron, M. Yseboodt and C. Bizouard : *Nutation at the sub-milliarsecond level*, in *JGR*, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 2002.

[FUCHS et al 02] F. Fuchs, H. Jibrini, G. Maillet, N. Paparoditis, M. Pierrot Deseilligny & F. Taillandier : *Trois approches pour la reconstruction automatique de modèles 2-D de bâtiments en imagerie aérienne haute résolution*, in *Bulletin de la SFPT n°166*, pp.10-18, laboratoire MATIS, IGN/SR-02-011/C-ART-FF, 2002.

[GARAYT et al 02] B. Garayt, T. Duquesnoy, T. Gattacceca, M. Kasser and A. Harmel : *National Report of France. Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Band 23*, in *Euref publication n°10*, Edit. BKG, Frankfurt am Main 2002, pp. 223-226, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 2002.

[GUIGUES et al 02] L. Guigues, H. Le Men and J.-P. Cocquerez : *The Hierarchy of the Cocoons of a Graph and its Application to Image Segmentation*, in *Pattern Recognition Letters 2002*, laboratoire MATIS, IGN/SR-02-038/C-ART/LG, 2002.

[JAMET, DIAMENT 02] O. Jamet and M. Diament : *On the estimation of local spectral representations of gravity anomalies*, in *Cahier du Centre européen de géodynamique et de séismologie*, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 2002.

[JUNG 02b] F. Jung : *Detecting new buildings from time varying aerial stereo pairs*, PE&RS, laboratoire MATIS, IGN/SR-02-027/C-ART-FJ, 2002.

[KASSER 02] M. Kasser : *Les nouvelles bases géodésiques françaises. Mensuration, Photogrammétrie*, in *Génie rural*, 1/2002, pp. 24-26, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 2002.

[MANCHE et al 02] Y. Manche, M. Naaim & P. Berthet-Rambaud : *Analyse spatiale du risque d'avalanche basée sur l'utilisation des modèles de simulations et des systèmes d'informations*, in *Revue Internationale de Géomatique*, 20 pages, laboratoire COGIT, IGN/SR-02-008/S-ART-YM, 2002.

[MANCHE et al 02] Y. Manche, M. Villanova, H. Martin & R. Burnet : *Un système d'information dans le domaine des risques naturels : le projet SIRVA*, in *Revue Internationale de Géomatique*, 16 pages, laboratoire COGIT, IGN/SR-02-009/S-ART-YM, 2002.

[MEGHRAOUI et al 02] M. Meghraoui, E. Calais, T. Camelbeeck and J.-M. Nocquet : *Active Deformation in Intraplate Europe : Faulting Processes and Related Seismic Hazard Assessment*, *Geologie en Mijnbouw*, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 2002.

[MOREL, WILLIS 02] L. Morel and P. Willis : *Parameter sensitivity of TOPEX orbit and derived Mean Sea Level to DORIS stations coordinates*, in *Advanced Space Research*, Vol 30, N°2, pp. 255-263, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 2002.

[MOTET 02] S. Motet : *Correspondances entre représentations*, in *Revue internationale de géomatique*, vol. 12, n.1/2002, pp. 9-25, laboratoire COGIT, IGN/SR-02-051/S-ART/SM, 2002.

[NOCQUET et al 02] J.-M. Nocquet, E. Calais and F. Jouanne : *Current strain regime in the Western Alps from continuous GPS measurements*, in *Geology*, vol. 30, 7, pp. 651-654, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 2002.

- [NOCQUET et al 02] J.-M. Nocquet, E. Calais, Z. Altamimi, P. Sillard and C. Boucher : *Intraplate deformation in Western Europe deduced from an analysis of the ITRF97 velocity field*, in J. Geophys. Res. 106 B6, pp. 11239-11257, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 2002.
- [NOCQUET, CALAIS 02] J.-M. Nocquet and E. Calais : *Geodetic measurements of crustal deformation in the Western Mediterranean and Europe, Pure and Applied Geophysics*, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 2002.
- [NOCQUET, CALAIS 02] J.-M. Nocquet and E. Calais : *The velocity field in Western Europe derived from permanent GPS networks*, in Geophysical Journal International, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 2002.
- [SHEEREN 02] D. Sheeren : *L'appariement pour la constitution de bases de données géographiques multi-résolutions. Vers une interprétation des différences de représentation*, in Revue internationale de Géomatique, vol. 12N, 2-2002, pp. 151-168, laboratoire COGIT, IGN/SR-02-020/S-ART-DS, 2002.
- [TAVERNIER et al 02] G. Tavernier, L. Soudarin, K. Larson, C. Noll, J. Ries and P. Willis : *Current status of the DORIS Pilot Experiment and the future international DORIS Service, New Trends in Space Geodesy*, in Adv. Space Res., 30, 2, pp 151-156, (comité de lecture), laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 2002.
- [TAVERNIER et al 02] G. Tavernier, M. Feissel, F. Lemoine, C. Noll, J. Ries, L. Soudarin and P. Willis : *Report of the DORIS Coordination Center*, in CSTG Bull. IAG Section II, Munich, 2002, 17, pp. 7075, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 2002.
- [VIGNY et al 02] C. Vigny, J. Chéry, T. Duquesnoy, F. Jouanne, J. Ammann, M. Anzidei, J.-P. Avouac, F. Barlier, R. Bayer, P. Briole, E. Calais, F. Cotton, F. Duquenne, K. Feigl, G. Ferhat, M. Flouzat, J.-F. Gamond, A. Geiger, A. Harmel, M. Kasser, M. Laplanche, M. Le Pape, G. Martinod, B. Menard, J./C. Meyer, J.-M. Ruegg, O. Scheubel, G. Scotti and G. Vidal : *GPS network monitors the Western Alps deformation over a five-year period : 1993-1998*, in J. of Geodesy (2002) 76, pp. 63-76, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 2002.
- [WILLIS 02] P. Willis : *Satellite navigation systems*, in The Standard Handbook for Aeronautical and Astronautical Engineers, pp. 15.24-15-33, M. Davies (Ed.), Mc Graw-Hill, October 2002, ISBN-0071362290, 1360 p., laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 2002.
- [WILLIS et al 02] P. Willis, B. Haines, Y. Bar/Sever, W. Bertiger, R. Muellerschoen, D. Kuang and S. Desai : *Topex/Jason combined GPS/DORIS orbit determination in the tandem phase*, COSPAR, Houston (USA), October 2002, #COSPAR02-A-00547, in Adv. Space Res., laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 2002.

Autres articles

- [KASSER 02] M. Kasser : *Avec le RGF93, les éléments d'un bornage virtuel sont réunis*, in Géomètre n°5, mai 2002, p. 39, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 2002.
- [KASSER 02] M. Kasser : *Congrès de la FIG, l'Allemagne entame son mandat de quatre ans*, in Géomètre n°6, juin 2002, p. 22, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 2002.
- [KASSER 02] M. Kasser : *L'ortho-photographie institutionnelle*, in Géomètre n°11, décembre 2002, pp. 33-43, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 2002.
- [KASSER, BERTERRECHE 02] M. Kasser & J. Berterreche : *La France développe son réseau pour affronter un marché en explosion*, in Géomètre n°4, avril 2002, pp. 34-35, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 2002.
- [KASSER, GARAYT 02] M. Kasser & B. Garayt : *RGP, décompression, conversions, corrections : un service public global*, in Géomètre n°4, avril 2002, pp. 36-37, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 2002.

Articles parus dans ce bulletin

- [ALTAMIMI et al 02] Z. Altamimi : *Combinaison de séries temporelles des positions des stations et des paramètres de rotation de la Terre*, in Bulletin d'Information de l'IGN n°74, 2003/2, Activité recherche 2002, pp. 129-132, IGN (Eds), IGN/ENSG/laboratoire LAREG, IGN/SR-02-001/R-ART-ZA, 2002.
- [BADARD, BRAUN 02] T. Badard & Arnaud Braun : « *Oxygène* » : *une plate-forme interopérable pour le déploiement de services Web géographiques*, in Bulletin d'Information de l'IGN n°74, 2003/2, Activité recherche 2002, pp. 112-120, IGN (Eds), laboratoire COGIT, IGN/SR-02-053/S-ART-TB, 2002.
- [BARD 02] S. Bard : *L'évaluation de la généralisation*, in Bulletin d'Information de l'IGN n°74, 2003/2, Activité recherche 2002, pp. 79-86, IGN (Eds), laboratoire COGIT, IGN/SR-02-054/S-ART-SB, 2002.
- [BOCK et al 02] O. Bock, J. Tarniewicz, Y. Morille, J. Pelon & Ch. Thom : *Développement d'un lidar Raman pour le sondage de la vapeur d'eau et la correction des délais troposphériques en GPS*, in Bulletin d'Information de l'IGN n°74, 2003/2, Activité recherche 2002, pp. 63-70, IGN (Eds), laboratoire OEMI, IGN/SR-02-004/-ART-OB, 2002.
- [BOLDO 02] D. Boldo : *Fabrication de vraies ortho-images et correction des ombres*, in Bulletin d'Information de l'IGN n°74, 2003/2, Activité recherche 2002, pp. 25-36, IGN (Eds), laboratoire MATIS, IGN/SR-02-018/C-ART-DB, 2002.
- [DUCHÊNE 02] C. Duchêne : *Coordination multi-agents pour la généralisation automatique*, in Bulletin d'Information de l'IGN n°74, 2003/2, Activité recherche 2002, pp. 97-111, IGN (Eds), laboratoire COGIT, IGN/SR-02-055/S-ART-CD, 2002.
- [GLEYZE 02] J.-F. Gleyze : *Fonctionnalité et vulnérabilité du réseau de métro parisien*, in Bulletin d'Information de l'IGN n°74, 2003/2, Activité recherche 2002, pp. 87-96, IGN (Eds), laboratoire COGIT, IGN/SR-02-056/S-ART-JFG, 2002.

- [JAMET, SILLARD 02] O. Jamet & P. Sillard : *Simulation du champ de pesanteur à partir d'un modèle géologique en trois dimensions : un outil pour l'évaluation des méthodes de calcul de géoïde*, in Bulletin d'Information de l'IGN n°74, 2003/2, Activité recherche 2002, pp. 121-128, IGN (Eds), IGN/ENSG/laboratoire LAREG, IGN/SR-02-002/R-ART-OJ, 2002.
- [MAILLET, FLAMANC 02] G. Maillet & D. Flamanc : *Prototype de logiciel pour la réalisation de BD Bâti 3-D*, in Bulletin d'Information de l'IGN n°74, 2003/2, Activité recherche 2002, pp. 15-24, IGN (Eds), laboratoire MATIS, IGN/SR-02-025/C-ART-GM, 2002.
- [MUSTIÈRE et al 02] S. Mustière, N. Gesbert & D. Sheeren : *Unification des bases de données géographiques*, in Bulletin d'Information de l'IGN n°74, 2003/2, Activité recherche 2002, pp. 71-78, IGN (Eds), laboratoire COGIT, IGN/SR-02-057/S-ART-SM, 2002.
- [SOUCHON, THOM 02] J.-Ph. Souchon & Ch. Thom : *Un canal proche infrarouge pour la caméra numérique de l'IGN*, in Bulletin d'Information de l'IGN n°74, 2003/2, Activité recherche 2002, pp. 53-62, IGN (Eds), laboratoire OEMI, IGN/SR-02-005/L-ART-JPS, 2002.

Communications à congrès

- [BARD 02] S. Bard : *Quality Assessment of Generalised Geographical Data*, in Proceedings of the 5th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences (Accuracy'02), Gary J. Hunter and Kim Lowell (Eds), Melbourne (Australie), laboratoire COGIT, IGN/SR-02-012/S-COM-SB, 2002.
- [BARILLOT 02] X. Barillot : *Characterization of complex bends*, GISRUK'02, Sheffield (UK), 3-5 avril 2002, Session 4C, pp. 179-181, in Proceedings, laboratoire COGIT, IGN/SR-02-011/S-COM-XB, 2002.
- [BOFFET 02] A. Boffet : *Analyse multi-niveaux des espaces urbains*, 6^{èmes} Journées Cassini, laboratoire COGIT, IGN/SR-02-019/S-COM-AB, 2002.
- [CHEHATA et al 02] N. Chehata, M. Pierrot Deseilligny, F. Jung and G. Stamon : *Extraction of 3D primitives from stereopairs of satellite images for automatic reconstruction of buildings*, IAPR:MVA'02, 11-13 décembre 2002, Japon, laboratoire MATIS, IGN/SR-02-020/C-COM-NC, 2002.
- [CHRISTOPHE, RUAS 02] S. Christophe & A. Ruas : *Detecting building Alignments for Generalisation Purposes*, in Advances in spatial Data Handling, SDH'02, pp. 419-432, Springer, laboratoire COGIT, IGN/SR-02-013/S-COM/SC, 2002.
- [DE JOINVILLE, FERRAND 02] O. de Joinville and B. Ferrand : *Airborne Laser : State of the Art and Quality Assessment of Derived DEMs*, Congrès PRRS'02, Niagara Falls (Canada), 16 août 2002, laboratoire MATIS, IGN/SR-02-008/C-COM-ODJ, 2002.
- [DEBAQUE et al 02] B. Debaque, G. Stamon, M. Pierrot Deseilligny : *An Area Based Alignment Method for 3D Urban Models*, 6th ICPR, août 2002, Québec City, laboratoire MATIS, IGN/SR-02-015/C-COM-BD, 2002.
- [DEHANT et al 02] : V. Dehant, M. Feissel, O. de Viron, M. Yseboodt and C. Bizouard : *Nutation at the milliardsecond Level*, JGR'02, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 2002.
- [DESAI et al 02] S. Desai, B. Haines, W. Bertiger, D. Kuang, R. Muellerschoen and P. Willis : *Evaluation of GPS-based orbits for the Jason-1 Mission with Application to Near Real-Time Sea Surface Heights*, AGU Fall meeting, San Francisco (USA), décembre 2002, poster, #OS52A0196, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 2002.
- [DROT et al 02] S. Drot, H. Le Men, X. Descombes and J. Zerubia : *Object Point Process for Image Segmentation*, 16th ICPR, août 2002, Québec City, laboratoire MATIS, IGN/SR-02-014/C-COM/SD, 2002.
- [FEISSEL-VERNIER, MA 02] M. Feissel-Vernier and C. Ma : *Radio source stability and the observation of precession and nutation*, in Proc. IVSGM2, Tsukuba (Japon), laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 2002.
- [GESBERT 02] N. Gesbert : *Recherche de concepts fédérateurs dans les bases de données géographiques*, in Actes des 6^{èmes} journées Cassini, pp. 365 à 368, laboratoire COGIT, IGN/SR-02-022/S-COM-NG, 2002.
- [HAINES et al 02] B.J. Haines, S. Desai, P. Willis, D. Kuang, T. Munson and W. Bertiger : *Results from the Jason-1 BlackJack GPS Receiver : Towards a 1/Cm Orbit*, JASON Science Working Team Meeting, New Orleans (USA), poster, October 2002, http://ofps.uncar.edu/joss-psg/meetongs/TOPEX2002/haines_1.htm, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 2002.
- [HAINES et al 02] B.J. Haines, W.I.B. Bertiger, S. Desai, D. Kuang, T. Munson, L. Young and P. Willis : *Initial Orbit Determination Results for Jason 1 : Towards a 1 cm Orbit*, in Proc. ION GPS 2002, Portland (USA), September 2002, pp. 2011-2021, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 2002.
- [HUBERT 02] F. Hubert : *Map Samples to Help GI Users specify their Needs*, 10th International Symposium on Spatial Data Handling, SDH'02, Ottawa, Canada, 9-12 juillet 2002, Diane Richardson and Peter van Oosterom (Eds), Springer-Verlag, Berlin (D), pp. 533-545, laboratoire COGIT, IGN/SR-02-023/S-COM-FH, 2002.
- [JUNG 02a] F. Jung : *Détection de Changements par Comparaison de Couples Stéréoscopiques*, in Geomatique Expert mai 2002, laboratoire MATIS, IGN/SR-02-017/C-COM-FJ, 2002.
- [JUNG 02a] F. Jung : *Extracting 3D edgels hypothesis from multiple calibrated images : a step toward the reconstruction of curved and straight objet boundary line*, PCV'02, laboratoire MATIS, IGN/SR-02-027/C-COM-FJ, 2002.
- [KADRI-DHAMANI, OSMANI 02] H. Kadri-Dhamani and A. Osmani : *Updating Data in GIS : how to maintain Database consistency ?* ICEIS'02, Ciudad Real (Spain), in Proceedings, vol. 1, pp. 587-593, laboratoire COGIT, IGN/SR-02-024/S-COM-HKD, 2002.

- [MAILLET et al 02] G. Maillet, N. Paparoditis, F. Jung and F. Taillandier : *TIN surface reconstruction from multiple calibrated aerial images in urban areas*, ICIP'02, Rochester (NY), laboratoire MATIS, IGN/SR 97-012/C-COM-GM, septembre 2002.
- [NOCQUET 02] J.-M. Nocquet : *The crustal velocity field in Western Europe derived from permanent GPS arrays solutions and campaigns - Tectonic implications*, MIT crustal geodesy group, 5 février 2002, Boston (USA) and Department of Earth Sciences, 10 mai 2002, Université d'Oxford, (UK), laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 2002.
- [NOCQUET et al 02] J.-M. Nocquet, E. Calais and P. Nicolon : *National report of France at the EUREF symposium : An example of EUREF - EPN solution densification : combination with the RGP (french permanent GPS network) and the REGAL (permanent GPS network in the western Alps)*, EUREF Symposium, Azores, juin 2002, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 2002.
- [NOTHNAGEL et al 02] A. Nothnagel, R. Dill, M. Feissel-Vernier, R. Ferland, R. Noomen and P. Willis : *EOP Alignment Campaign, IDS/IGS/ILRS/IVS EOP combinations, systematic errors*, Position paper, ERS Workshop, Munich (D), novembre 2002, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 2002.
- [PEERBOCUS et al 02] A. Peerbocus, G. Jomier and T. Badard : *A methodology for updating geographic databases using map versions*, Advances in Spatial Data Handling (SDH'02), D. Richardson and von Oosterom (Eds), Springer-Verlag, Berlin (D), pp. 363-376, laboratoire COGIT, IGN/SR-02-025/S-COM-AP, 2002.
- [RUAS 02] A. Ruas : *Generalisation of updated in the context of multiple representation*, Joint, ISPRS-ICA Workshop on "Multi/Scale Representations of Spatial Data", http://www.ikg.uni-hannover.de/isprs/list_of_presentation.html, Ottawa (Canada), laboratoire COGIT, IGN/SR-02-027/S-COM-AR, 2002.
- [RUAS 02] A. Ruas : *Spatial Analysis and Agent Principles to automate Generalisation*, International Workshop on semantic processing on spatial Data, GeoPro2002, ISBN : 970-18-8521-X, <http://geopr02002.cic.ipn.mx/index.htm>, laboratoire COGIT, IGN/SR-02-028/S-COM-AR, 2002.
- [SHEEREN 02] D. Sheeren : *L'appariement pour la constitution de bases de données géographiques multi-résolutions. Vers une interprétation des différences de représentation*, in Actes des 6^{èmes} journées Cassini, 2002, pp. 207-225, laboratoire COGIT, IGN/SR-02-021/S-COM-DS, 2002.
- [SHEEREN et al 02] D. Antazis, B. Cornélis, R. Billen & D. Sheeren : *Establishment of a geographic data dictionary : a case study of UrbIS 2, the Brussels regional government GIS*, Computers, Environment & Urban Systems, 26 (1), pp. 3-17, 22nd Urban and Data Management Symposium, Delft University, The Netherlands, laboratoire COGIT, IGN/SR-02-017/S-COM-DS, 2002.
- [SOUCHAY, FEISSEL-VERNIER 02] J. Souchay and M. Feissel-Vernier : *Celestial reference frame issues*, article de synthèse pour l'IERS Workshop on combination research and global geophysical fluids, Munich (D), 18-21 novembre 2002, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 2002.
- [TAILLANDIER, DERICHE 02] F. Taillandier & R. Deriche : *Reconstruction de primitives linéaires 3-D multi-vues pour la modélisation de scènes urbaines*, RFIA'02, pp. 115-124, laboratoire MATIS, IGN/SR-02-002/C-COM-FT, 2002.
- [TAILLANDIER, DERICHE 02b] F. Taillandier & R. Deriche : *3-D reconstruction of linear primitives from multiple images for urban area modelisation*, PCV'02, Graz (A), laboratoire MATIS, IGN/SR-02-019/C-COM-FT, 2002.
- [VIGLINO, GUIGUES 02] J.-M. Viglino & L. Guigues : *Géo-référencement Automatique de Feuilles Cadastrales*, in Proceedings of RFIA'02, vol. 1, pp.135-143, Angers (France), laboratoire MATIS, IGN/SR-02-001/C-COM-JMV, janvier 2002.
- [WILLIS et al 02] P. Willis, B. Haines, Y. Bar/Sever and L. Young : *DORIS/JASON clock behavior assessment in the South Atlantic Anomaly region*, JASON Science Working Team Meeting, New Orleans (USA), poster, October 2002, http://www.aviso.oceanobs.com/documents/swt/posters2002_2/willis.pdf, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 2002.
- [WILLIS et al 02] P. Willis, B. Haines, Y. Bar/Sever, W. Bertiger, R. Muellerschoen, D. Kuang and S. Desai : *Topex/Jason combined GPS/DORIS orbit determination in the tandem phase*, COSPAR, Houston (USA), October 2002, #COSPAR02-A-00547, accepté pour publication dans Adv. Space Res., laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 2002

Livres

- [BORDIN 02] P. Bordin : *SIG : concepts, outils et données*, Éd. : Hermès science publications (Lavoisier), Paris, 2002, ISBN 2-7462-0554-8, laboratoire COGIT, IGN/SR-02-029/S-LIV-PB, 2002.
- [BOTTON et AL 02] S. Botton, F. Duquenne, Y. Egels, M. Even & P. Willis : *GPS, Localisation et navigation*, CNIG, Ed. Hermès, 2002, nouvelle édition, 2002.
- [COLLECTIF Bureau des longitudes 02] *Rapport sur Galileo*, ouvrage collectif, 2002.
- [RUAS 02] (sous la direction de), auteurs : A. Aissaoui, M.K. Allouche, T. Badard, M. Bader, X. Barillot, M. Barrault, Y. Bédard, R. Béra, E. Bernier, A. Bianchin, A. Boffet, A. Cecconi, R. Devillers, T. Devogele, C. Duchêne, M. Galanda, E. Guilbert, S. Larrivière, F. Lecordix, C. Lemarié, T. Libourel, M. Minout, B. Moulin, S. Mustière, C. Parent, C. Plazanet, M.J. Proulx, N. Regnauld, A. Ruas, E. Saux, S. Spaccapietra, R. Thibaud, C. Vangenot, R. Weibel, E. Zimani & J.D. Zucker : *Généralisation et représentation multiple*, Éd. : Hermès science publications (Lavoisier), Paris, 2002, ISBN 2-7462-04994-0, 396 pages, www.Hermes/Science.com, laboratoire COGIT, IGN/SR-02-047/S-LIV-AR, 2002.

Chapitres de livres

- [BADARD, LEMARIÉ 02] T. Badard & C. Lemarié : *Associer des données : l'appariement*, in Information Géographique et Aménagement du Territoire (IGAT), Traité de Géomatique, Généralisation et Représentation multiple, chapitre 9, pp. 163-183, Hermès sciences (Lavoisier), Paris 2002, laboratoire COGIT, IGN/SR-02-030/S-CHA-TB, 2002.
- [BADARD, SPÉRY 02] T. Badard & L. Spéry : *Problèmes liés à l'échange et à l'interprétation des mises à jour dans les bases de données géographiques*, in Information Géographique et Aménagement du Territoire (IGAT), Traité de Géomatique, Généralisation et Représentation multiple, Hermès sciences (Lavoisier), Paris (à paraître), sous la direction de Thérèse Libourel & Sylvie Servigne, laboratoire COGIT, IGN/SR-02-031/S-CHA-TB, 2002.
- [BARILLOT 02] X. Barillot : *Mesures et structures d'analyses*, in Information Géographique et Aménagement du Territoire (IGAT), Traité de Géomatique, Généralisation et Représentation multiple, chapitre 10, pp. 187-201, Hermès sciences (Lavoisier), Paris 2002, laboratoire COGIT, IGN/SR-02-032/C-CHA-XB, 2002.
- [BARILLOT, PLAZANET 02] X. Barillot & C. Plazanet : *Analyse des formes des routes*, in Information Géographique et Aménagement du Territoire (IGAT), Traité de Géomatique, Généralisation et Représentation multiple, chapitre 11, pp. 203-224, Hermès sciences (Lavoisier), Paris 2002, laboratoire COGIT, IGN/SR-02-033/S-CHA-XB, 2002.
- [DEVOGELE et al 02] T. Devogele, T. Badard & T. Libourel : *La problématique de la représentation multiple*, in Information Géographique et Aménagement du Territoire (IGAT), Traité de Géomatique, Généralisation et Représentation multiple, chapitre 3, pp. 55-74, Hermès sciences (Lavoisier), Paris 2002, laboratoire COGIT, IGN/SR-02-034/S-CHA-TD, 2002.
- [DUCHÊNE, REGNAULD 02] C. Duchêne & N. Regnaud : *Le modèle AGENT*, in Information Géographique et Aménagement du Territoire (IGAT), Traité de Géomatique, Généralisation et Représentation multiple, chapitre 21, pp. 369-386, Hermès sciences (Lavoisier), Paris 2002, laboratoire COGIT, IGN/SR-02-035/S-CHA/CD, 2002.
- [MUSTIÈRE, LECORDIX 02] S. Mustière & F. Lecordix : *La généralisation du linéaire routier : des algorithmes et leur enchaînement*, in Information Géographique et Aménagement du Territoire (IGAT), Traité de Géomatique, Généralisation et Représentation multiple, chapitre 13, pp. 241-255, Hermès sciences (Lavoisier), Paris 2002, laboratoire COGIT, IGN/SR-02-036/S-CHA/SM, 2002.
- [MUSTIÈRE, ZUCKER 02] S. Mustière & J.-D. Zucker : *Généralisation cartographique et apprentissage automatique à partir d'exemples*, in Information Géographique et Aménagement du Territoire (IGAT), Traité de Géomatique, Généralisation et Représentation multiple, chapitre 20, pp. 353-368, Hermès sciences (Lavoisier), Paris 2002, laboratoire COGIT, IGN/SR-02-037/S-CHA/SM, 2002.
- [RUAS 02] A. Ruas : *Les problématiques de la généralisation*, in Information Géographique et Aménagement du Territoire (IGAT), Traité de Géomatique, Généralisation et Représentation multiple, chapitre 4, pp. 75-90, Hermès sciences (Lavoisier), Paris 2002, laboratoire COGIT, IGN/SR-02-038/S-CHA-AR, 2002.
- [RUAS 02] A. Ruas : *Pourquoi associer les représentations des données géographiques ?* Traité IGAT (Information Géographique et Aménagement du Territoire), Information et généralisation multiple, direction : Anne Ruas, pp. 45-54, Ed : Hermès, laboratoire COGIT, IGN/SR-02-52/S-ART-AR, 2002.
- [RUAS, BIANCHIN 02] A. Ruas & A. Bianchin : *Echelle et niveau de détail*, in Information Géographique et Aménagement du Territoire (IGAT), Traité de Géomatique, Généralisation et Représentation multiple, chapitre 2, pp. 25-44, Hermès sciences (Lavoisier), Paris 2002, laboratoire COGIT, IGN/SR-02-039/S-CHA-AR, 2002.

Rapports de stage

- [BEAUVISAGE 02] B. Beauvisage : *Sémiologie pour la représentation de la qualité d'une généralisation*, rapport de stage de DESS Cartographie & SIG, Université Paris-1, laboratoire COGIT, IGN/SR-02-002/S-STA-BB, 2002.
- [BOUDET 02] L. Boudet : *Estimation de déplacements sub-pixellaire entre deux images pour la surveillance d'ouvrages*, rapport de stage de DESS ingénierie mathématique et traitement du signal, laboratoire MATIS, IGN/SR-02-033/C-STA/LB, 2002.
- [CHATELET 02] A. Chatelet : *Calibrage fin de la caméra numérique*, rapport de stage de l'ENSPM, laboratoire MATIS, IGN/SR-02-036/C-STA-AC, 2002.
- [COROLLER 02] Pierre Coroller : *Étude des stations du métro parisien*, rapport préliminaire de DESS : Cartographie, Ecole Nationale des Sciences Géographiques, Marne/La-Vallée, 35 pages, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, juillet 2002.
- [DEVEAU 02] M. Deveau : *Reconstruction d'édifices architecturaux par utilisation conjointe d'images de distance (laser) et d'images optiques*, rapport de stage du Master de photogrammétrie de l'ENSG, laboratoire MATIS, IGN/SR-02-034/C-STA-MD, 2002.
- [FOUILLET 02] M. Fouillet : *Étude de l'efficacité d'un réseau de transport - Application au réseau métropolitain parisien*, stage de fin d'études encadré par J.-F. Gleyze, IUP Génie Mathématique et Informatique, Université Paris-9 Dauphine, 94 pages + annexes, laboratoire COGIT, IGN/SR-02-001/S-STA-MF, avril/Septembre 2002.
- [GARNIER 02] A. Garnier : *Modélisation de textures dans les images aériennes*, rapport de stage ESSI, laboratoire MATIS, IGN/SR-02-030/C-STA-AG, 2002.
- [GULDNER] B. Guldner : *Caricatures de MNS appliquées à des données laser*, rapport de stage de maîtrise en informatique, laboratoire MATIS, IGN/SR-02-031/C-STA-BG, 2002.
- [HOLZAPFEL 02] F. Holzapfel : *Détection et caractérisation des alignements*, rapport de stage encadré par Anne Ruas, DEA Statistique, Université P. & M. Curie, Paris-6, laboratoire COGIT, IGN/SR-02-015/S-STA-FH, avril/septembre 2002.

- [JACQUES 02] M. Jacques : *Modèles de BRDF adaptés aux matériaux urbains*, rapport de stage de DESS Optique physique et matériaux, laboratoire MATIS, IGN/SR-02-035/C-STA-MJ, 2002.
- [LEKKAT 02] S. Lekkat : *Évaluation objective de critères de segmentation*, rapport de stage de DEA ETIS, laboratoire MATIS, IGN/SR-02-029/C-STA/SE, 2002.
- [MORILLE 02] Y. Morille : *Analyse de la distribution de la vapeur d'eau atmosphérique et étude de son effet sur les mesures GPS*, rapport de stage de DESS Ingénierie en Opto-électronique, Signal et Imagerie, laboratoire OEMI, IGN/SR-02-002/L/STA-YM, septembre 2002.
- [NEMPONT 02] O. Nempont : *Extraction et la qualification de primitives surfaciques en imagerie aérienne multi-vues*, rapport de stage de l'ENST, laboratoire MATIS, IGN/SR-02-037/C-STA-ON, 2002.
- [OULDELALA 02] A. Ouldela : *Évaluations de Modèles Numériques de Surface calculés à partir de données laser*, mémoire de fin de stage de DEA Réalité virtuelle & maîtrise des systèmes complexes, maître de stage : O. de Joinville, laboratoire MATIS, IGN/SR-02-010/C-STA-AO, 2002.
- [TAOUSS 02] A. Taouss : *Mise en place d'un serveur de méta-données géographiques*, mémoire de stage de DEA SIG, Université de Marne/La-Vallée, laboratoire COGIT, IGN/SR-02-041/S-STA-AT, juin 2002.
- [TOLLU 02] V. Tollu : *Extraction de linéon pour la reconstruction de paysage 3-D urbains par mise en correspondance robuste de contours d'images multiples*, rapport de stage de l'UTC, laboratoire MATIS, IGN/SR-02-032/C-STA-VT, 2002.

Rapports internes et comptes rendus

- [BARILLOT 02] X. Barillot : *Compte rendu de la conférence GISRUK'02 : Characterisation of complex bends*, Sheffield (UK), 3-5 avril 2002, Session 4C, laboratoire COGIT, IGN/SR-02-011/S-CRD-XB, 2002.
- [BUCHER 02] B. Bucher : *Report on markup Languages, SPIRIT Project deliverable*, Paris, laboratoire COGIT, IGN/SR-02-044/S-RAP-BB, septembre 2002.
- [GLEYZE 02] J.-F. Gleyze : *Le risque*, synthèse bibliographique, rapport interne, version 2, 256 pages, laboratoire COGIT, IGN/SR-02-006/S-RAP-JFG, janvier 2002.
- [GLEYZE 02] J.-F. Gleyze : *Réseaux, territoires et accessibilité*, synthèse bibliographique, rapport interne, version 2, 136 pages, IGN/SR-02-007/S-RAP-JFG, janvier 2002.
- [JAMET 02] O. Jamet : *Interpolation des déformations entre Géoroute et la BDTopo*, rapport n°1, rapport d'étude, LAREG R004, IGN-ENSG, avril 2002.
- [JAMET 02] O. Jamet : *Interpolation des déformations entre Géoroute et la BD Topo*, rapport n°2, rapport d'étude, laboratoire LAREG (en cours de publication), IGN-ENSG, 2002.
- [JAMET 02] O. Jamet : *Inversion des densités à l'intérieur du volume des sources sur un critère de minimisation d'énergie ; éléments de théorie*, rapport de recherche, LAREG R005, IGN-ENSG, juin 2002.
- [MURMUR] Les rapports du *Projet européen MurMur* sont disponibles sur le site : <http://lbdwww.epfl.ch/e/MurMur/>.
- [MUSTIÈRE 02] S. Mustière : *Description des processus d'appariement mis en œuvre au COGIT*, rapport technique, laboratoire COGIT, IGN/SR-02-026/S-RAP/SM, 2002.
- [TAVERNIER et al 2] G. Tavernier, M. Feissel, F. Lemoine, V. Noll, C. Ries, L. Soudarin and P. Willis : *Report of the DORIS Technique center*, 2001 IERS Annual Report, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 2002.
- [TRÉVISAN 02] J. Trévisan : *Bilan de l'étude préalable EP25K, Carte de Base à partir de la BD Pays*, rapport interne, IGN/SR-02-045/S-RAP-JT, 2002.
- [TRÉVISAN 02] J. Trévisan : *Comparaisons qualitatives des cartes BD Topo et des futures cartes BD Pays*, rapport interne, IGN/SR-02-046/S-RAP-JT, 2002.